FÍSICA PROGRAMADA

VOLUMEN III

ÓPTICA Y ONDAS

JOSEPH
Y LEAHY

LIMUSA WILEY

AUTORES

DR. ALEXANDER JOSEPH

Profesor de Física.
Jefe de la División de Ciencias y Matemáticas.
John Jay College of the University of the City of New York.

DANIEL J. LEAHY

Licenciado en Matemáticas.
Escuela de Estudios Generales.
Hunter College of the University of the City of New York.

FISICA PROGRAMADA

VOLUMEN III: OPTICA Y ONDAS

FISICA PROGRAMADA

VOLUMEN III: OPTICA Y ONDAS

Dr. Alexander Joseph

Profesor de Física
Jefe de la División de
Ciencias y Matemáticas
John Jay College of the
University of the City of New York.

Daniel J. Leahy

Licenciado en Matemáticas
Escuela de Estudios Generales
Hunter College of the University
of the City of New York.

EDITORIAL LIMUSA-WILEY, S. A.
MEXICO 1970

PROLOGO AL MAESTRO

Este libro es el tercero de una serie de cinco, que, en conjunto, constituyen el texto para un curso anual de física programada. El volumen I de Mecánica, el II de Electricidad y Magnetismo y el IV de Teoría Cinética y Termodinámica, tratan sus respectivas materias como un curso de introducción a la física; el volumen V tratará sobre temas de física moderna y contemporánea.

Estos libros programados están destinados principalmente para el último año de preparatoria o el primero de profesional, y todas las pruebas de aprovechamiento en el aprendizaje se realizaron con estudiantes de estos cursos. Consideramos que estos libros de nivel profesional son especialmente apropiados para estudiantes que se especializan en ciencias sociales y también para los planes de estudio de los primeros años de facultad.

Optica y Ondas requiere del estudiante un conocimiento general de mecánica, práctica en geometría plana, trigonometría del triángulo rectángulo y además, habilidad en el manejo de símbolos y ecuaciones algebraicas. La prueba de conocimientos de las páginas 11-12, proporcionará al estudiante un medio para evaluar estos requisitos.

Recomendamos completar el estudio de este libro con demostraciones y discusiones en clase y prácticas de laboratorio, siempre que sea posible. No obstante que el propósito de este curso programado es usarlo sin el auxilio de un libro de texto y con la mínima supervisión del maestro, ningún libro puede proporcionar por sí solo una introducción ideal a la física. Por ejemplo, hemos comprobado que los experimentos de laboratorio del PSSC, Physical Science Study Committee, son auxiliares muy útiles al texto. Las demostraciones en clase son particularmente útiles en los capítulos de reflexión y refracción, formación de imágenes en espejos y lentes, ondas en el agua (usando tanques de Ondas) y en espectros.

Los editores proporcionarán al maestro un manual del texto combinado, con respuestas a los problemas de fin de capítulo y sugerencias para el uso óptimo de cada volumen de este programa en sus contextos específicos.

Para terminar deseamos expresar nuestro agradecimiento al personal de John Wiley & Sons que nos ayudó para que la edición en inglés se

publicara, así como una gratitud especial a la Srita. Judy Vantrease que leyó el manuscrito y nos brindó muchas sugerencias valiosas acerca de su programación; a Cecil Yorke quien guió la preparación de un difícil manuscrito; y a George Flohn y los miembros del Departamento Artístico por sus oportunas sugerencias y excelente ejecución de los diagramas.

ALEXANDER JOSEPH
DANIEL J. LEAHY

Nueva York, 1965

CONTENIDO

INSTRUCCIONES PARA EL ESTUDIANTE 9
PRUEBA DE REQUISITOS 11

CAPÍTULO UNO

Iluminación y Fotometría 13

1. Objetos luminosos e iluminados 13
2. Propagación rectilínea; sombras 17
3. La rapidez de propagación de la luz 22
4. Medida de la intensidad luminosa 25
5. Repaso y problemas 29

CAPÍTULO DOS

Reflexión de la luz 37

1. Rayos, haces, rayos incidente y reflejado 37
2. Leyes de la reflexión 43
3. Imágenes en un espejo plano 51
4. Espejos esféricos cóncavos 55
5. La fórmula del espejo 71
6. Aberración esférica; espejos parabólicos 78
7. Repaso y problemas 82

CAPÍTULO TRES

Refracción de la luz 89

1. Repaso de trigonometría 90
2. Leyes de la refracción 95
3. Indice absoluto de refracción, 103
4. El ángulo límite y la reflexión total interna 115
5. Producción de imágenes por refracción; superficies refractoras de las lentes; la fórmula del fabricante de lentes 122
6. Formación de imágenes por lentes delgadas 137
7. Dispersión y color; aberración cromática; la lente acromática 147
8. Repaso y problemas 157

CAPÍTULO CUATRO

Ondas 165

1. Definición y propiedades de una onda 165
2. Ondas transversales y longitudinales 169
3. Propiedades de las ondas 171
4. Superposición de ondas 176
5. Reflexión de ondas 181
6. Ondas viajeras; ondas estacionarias 185
7. Ondas en el agua; difracción 192
8. Problemas 200

CAPÍTULO CINCO

Teoría ondulatoria de la luz 203

1. La teoría corpuscular de la luz 204
2. Ondas y luz; el principio de Huyghens 208
3. El experimento de Young; medida de la longitud de onda de la luz 215
4. Rejillas de difracción y espectros 223
5. Repaso y problemas 232

INSTRUCCIONES PARA EL ESTUDIANTE

Este libro es un texto *programado*. Esto significa que 1) las materias que trata un curso de introducción a la física han sido analizadas en una serie de pasos cortos y sencillos; y 2) estos pasos están presentados en la forma y secuencia que se ha encontrado es la más conveniente para un aprendizaje eficaz.

Cada paso se presenta en un espacio llamado *marco*. Cada marco presenta cierta cantidad de información; en seguida plantea una pregunta o un problema para que el estudiante lo conteste o resuelva, como comprobación de su comprensión antes de continuar. Escribirá sus respuestas a estas preguntas, ya sea en el espacio asignado para ello en el marco, o en una hoja de respuestas por separado, según le indique su maestro.

Cuando haya escrito su(s) respuesta(s), podrá verificar su validez comparándola(s) con la(s) correcta(s), que está(n) debajo de los asteriscos que indican el final de cada marco. Por ejemplo:

1. El metro es una unidad de longitud que tiene *39.37 pulgadas*. Una longitud de dos metros tiene ..... pulgadas.

* * * * *

78.74

2. El metro se emplea para medir (peso/longitud/tiempo) y equivale a ..... pulgadas.

* * * * *

longitud; 39.37

Los *paneles* a que se hace referencia están al final del libro y se pueden desdoblar para fácil referencia cuando el estudiante esté trabajando en ellos.

Se proporciona un protector para que usted pueda ocultar la respuesta del marco en el que esté trabajando y todos los marcos subsiguientes de una página, hasta que haya escrito su respuesta y esté listo para verificarla, moviendo el protector hacia abajo para descubrir la respuesta correcta, que está debajo de los asteriscos.

PRUEBA DE REQUISITOS DE MATEMATICAS

PARA *OPTICA Y ONDAS.*

En el espacio asignado a la derecha escriba la letra que corresponda a la respuesta correcta; si ninguna de las respuestas lo es, escriba "0" en el espacio.

1. Despeje x en: $\frac{x}{5} = \frac{7}{9}$

(*a*) $\frac{5}{63}$ (*b*) $\frac{7}{45}$ (*c*) $\frac{17}{15}$ (*d*) $3\frac{3}{7}$ (*e*) $4\frac{1}{6}$ 1. .....

2. Despeje x en: $\frac{15}{8} = \frac{5}{x}$

(*a*) $\frac{8}{3}$ (*b*) $\frac{3}{8}$ (*c*) $\frac{75}{8}$ (*d*) $\frac{8}{75}$ (*e*) 3 2. .....

3. Despeje x en: $\frac{1}{x} = \frac{1}{5} + \frac{1}{5}$

(*a*) 60 (*b*) 75 (*c*) 3.75 (*d*) 3 (*e*) $\frac{1}{20}$ 3. .....

4. Despeje x en: $\frac{1}{12} = \frac{1}{6} + \frac{1}{x}$

(*a*) 6 (*b*) -6 (*c*) 12 (*d*) -12 (*e*) 72 4. .....

5. Si $x = KT$, despeje T.

(*a*) Kx (*b*) $\frac{x}{K}$ (*c*) $\frac{K}{x}$ (*d*) $K + x$ (*e*) $x - K$ 5. .....

6. Si $x = \frac{y}{d^2}$ y $x = 5$ cuando $d = 4$, entonces y.

(*a*) 90 (*b*) 20 (*c*) $\frac{4}{25}$ (*d*) 29 (*e*) 80 6. .....

7. Si $x = \frac{y}{d^2}$; encuentre d cuando $x = 7$ y $y = \frac{1}{7}$.

(*a*) 49 (*b*) $\frac{1}{49}$ (*c*) 7 (*d*) $\frac{1}{7}$ (*e*) 1. 7. .....

8. Si $\frac{1}{x} = (n - 1)\frac{1}{y} + \frac{1}{z}$; encuentre x, si $n = 1.5$, $y = 3$ y $z = 2$.

(*a*) $\frac{5}{12}$ (*b*) $\frac{12}{5}$ (*c*) 12 (*d*) 5 (*e*) 8 8. .....

9. Escrito en notación científica (potencia de diez), 0.00000475 se convierte en:

(*a*) 4.75×10^6 (*b*) 475×10^{-6} (*c*) 4.75×10^{-6} (*d*) 475 (*e*) 475×10^6 9. .....

10. Convierta a cm 5,285 mm.

(*a*) 52.85 (*b*) 5.285 (*c*) 52.85 (*d*) 528.5 (*e*) 0.5285 10. .....

11. Convierta 12 m en centímetros.

(*a*) 0.12 (*b*) 1.2 (*c*) 12 (*d*) 120 (*e*) 1,200 11. .....

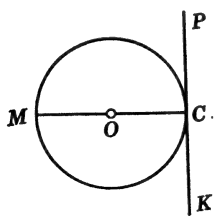
12. *PK* toca a este círculo en un solo punto *C*. *PK* es un(a):

(*a*) cuerda (*b*) secante (*c*) diámetro (*d*) tangente (*e*) radio. 12. .....

13. El centro de este círculo es *O*.

El ángulo *MCK* mide: *(use la respuesta más aproximada)*

(*a*) 180° (*b*) 270° (*c*) 60° (*d*) 90° (*e*) 0° 13. .....



CAPITULO 1

ILUMINACION Y FOTOMETRIA

OBJETIVOS:

Al terminar el estudio concienzudo de este capítulo, el estudiante debe ser capaz de:

1. Distinguir entre objetos luminosos e iluminados, opacos y transparentes, y fuentes incandescentes y luminiscentes.
2. Explicar la formación de sombras; definir sombra y penumbra.
3. Expresar el significado de propagación rectilínea.
4. Expresar la rapidez de la luz en el espacio abierto.
5. Calcular la intensidad luminosa o iluminación suministrada por fuentes puntuales a distancias específicas de la fuente.

NOTA PRELIMINAR

El capítulo 1 constituye la introducción a algunas de las propiedades de la luz y los conceptos que empleamos para describir los fenómenos ópticos; trata cualitativamente de ciertas propiedades como, por ejemplo, las sombras y su formación, con lo cual todos nosotros estamos más o menos familiarizados. Ciertas propiedades mencionadas aquí, como el hecho de que la luz parezca propagarse en línea recta y que su rapidez de propagación en el espacio libre sea una constante, aparecerán con frecuencia en capítulos posteriores.

En este capítulo no se hablará de la naturaleza física de la luz. Examinaremos dos teorías al respecto en el capítulo 5.

Como introducción al estudio cuantitativo de los fenómenos ópticos, en la sección 4 de este capítulo consideramos la medida de la intensidad luminosa y la iluminación, que son de interés práctico para el ingeniero.

Sección 1. Objetos luminosos e iluminados; Intensidad luminosa; Fuentes de luz incandescente, luminiscente y fluorescente.

1. A veces vemos las cosas porque *emiten* (arrojan) luz hacia nuestros ojos. A veces también, las vemos (probablemente las mismas cosas) porque *reflejan* hacia nuestros ojos la luz que emiten otras fuentes. Vemos

una vela encendida en una habitación que, de no ser por ello, estaría a obscuras porque .... hacia nuestros ojos.

* * * * *

emite luz

2. Vemos un cuadro en la pared, porque ..... luz hacia nuestros ojos.

* * * * *

refleja

3. En la noche vemos la Luna, porque ..... la luz que ..... el Sol.

* * * * *

refleja
emite

4. Un objeto *luminoso* es aquél que vemos debido a la luz que emite; un objeto *iluminado* es el que vemos debido a la luz que refleja. Vemos una vela apagada porque (es luminosa/está iluminada); vemos la flama de una vela en la obscuridad, porque (es luminosa/está iluminada).

* * * * *

está iluminada
es luminosa

5. Vemos los objetos luminosos por la luz que ..... hacia el ojo; vemos los objetos iluminados por la luz que ..... hacia el ojo.

* * * * *

emiten
reflejan

6. Se dice que un objeto es(tá) ..... por la luz que refleja; se dice que es(tá) ..... por la luz que emite.

* * * * *

iluminado
luminoso

7. Llamamos *fuente* al objeto que emite luz. Un objeto luminoso (es/no es) una fuente de luz.

* * * * *

es

8. Una fuente de luz tiene una *intensidad luminosa* susceptible de medirse. La flama de una vela y el Sol son .....s de luz; de ambas el Sol tiene una intensidad luminosa (mayor/menor).

* * * * *

fuentes
mayor

9. Toda fuente de luz tiene una ..... luminosa susceptible de medirse.

* * * * *

intensidad

10. A temperatura ambiente vemos un trozo de metal, como el platino, por la luz que ..... Si lo calentamos hasta que alcance una temperatura suficientemente alta, entonces podremos ver al trozo de platino, aun en un cuarto obscuro, por la luz que .....

* * * * *

refleja
emite

11. Decimos que un metal está *incandescente* cuando lo calentamos hasta que "brilla" y emite luz. Vemos un metal ..... por la luz que emite; en otras palabras, bajo estas condiciones, el metal es una ..... de luz.

* * * * *

incandescente
fuente

12. Entonces una clase de fuente luminosa es aquella substancia que ha sido ..... hasta que está incandescente. En general, a mayor temperatura de la fuente, mayor será la i..... l..... de la luz que emita.

* * * * *

calentada
intensidad luminosa

13. Para producir luz por incandescencia, mantendremos al objeto que estamos usando como fuente a una temperatura (alta/baja/moderada) con respecto a, digamos, la temperatura ambiente (aprox. 20°C). Ciertas substancias emiten luz *sin* volverse incandescentes; a estas substancias las llamamos *luminiscentes*. La flama de una vela es un ejemplo de

(incandescencia/luminiscencia); la luz que emite una luciérnaga es un ejemplo de (incandescencia/luminiscencia).

* * * * *

alta
incandescencia
luminiscencia

14. Ciertas substancias emiten luz visible cuando se les alumbra con luz ultravioleta; a estos materiales se les llama *fluorescentes*. El experimento indica que la radiación ultravioleta de esta clase *no* aumenta apreciablemente la temperatura de las substancias fluorescentes por encima de la temperatura ambiente. La luz de una fuente fluorescente (es/no es) incandescente. Explique.

* * * * *

no es
(porque tales substancias emiten luz sin tener que calentarse a altas temperaturas).

15. Casi inmediatamente después de que encendemos un foco ordinario se siente muy caliente al tocarlo. Un foco ordinario es una fuente (incandescente/luminiscente). Una lámpara fluorescente encendida nunca se siente demasiado caliente al tocarla; es una fuente luminosa (incandescente/luminiscente).

* * * * *

incandescente
luminiscente

16. Una manzana es un objeto (iluminado/luminoso) porque la vemos debido a la luz que ..... hacia el ojo. Un trozo de carbón al rojo vivo (brasa) es un objeto (iluminado/luminoso) porque lo vemos debido a la luz que ..... hacia el ojo.

* * * * *

iluminado
refleja
luminoso
emite

17. Un carbón al rojo vivo es una fuente luminosa (fluorescente/luminiscente/incandescente).

* * * * *

incandescente

18. En la obscuridad vemos la flama de una vela y el centelleo de una luciérnaga por la luz que ..... cada una de ellas. Ambos son

objetos (iluminados/luminosos). Sin embargo, la luciérnaga es una fuente .....; la flama de la vela es una fuente luminosa .....
* * * * *
emite; luminosos; luminiscente; incandescente

19. La luz ultravioleta hace que el sulfuro de cinc emita luz verde; a ésta la llamamos fuente (incandescente/fluorescente).
* * * * *
fluorescente

20. *Todo* objeto que emite luz tiene una (incandescencia/luminiscencia/fluorescencia/intensidad luminosa) susceptible de medirse.
* * * * *
intensidad luminosa

Sección 2. Propagación rectilínea; Sombras

1. Se dice que un objeto es *transparente* cuando la luz pasa a través de él como, por ejemplo, un trozo de vidrio, un vaso de agua, etc. Este libro (es/no es) transparente.
* * * * *
no es

2. Se llama *medio transparente* a una substancia a través de la cual pasa la luz. El aire (es/no es) un medio transparente.
* * * * *
es

3. La luz pasa a través de una hoja de vidrio, porque este material es un ....
* * * * *
medio transparente

4. Un objeto es *opaco* cuando no transmite la luz. Este libro (es/no es) opaco. Vemos el pez dorado bajo la superficie del agua en un acuario porque el agua es .....
* * * * *
es
transparente

5. Todos nosotros proyectamos una *sombra* (a menos que seamos fantasmas) porque la luz (pasa/no pasa) a través de nuestro cuerpo. Por lo tanto, somos objetos (transparentes/opacos).
* * * * *

no pasa; opacos

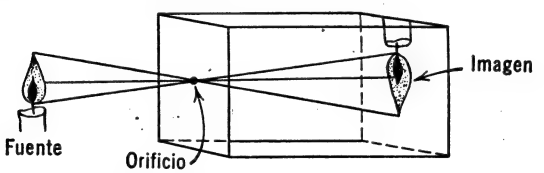
6. El agua de una pecera es un medio ..... Decimos que el pez es ..... porque proyecta sombra.
* * * * *

transparente
opaco

7. Un objeto opaco colocado entre una fuente luminosa y una pantalla proyecta una ..... sobre la pantalla.
* * * * *

sombra

8. *La cámara obscura.*



Las líneas representan los rayos luminosos de la fuente que pasan a través del orificio que hay en una pantalla y forman una imagen de la fuente en otra pantalla. La imagen formada por estos rayos es muy semejante a la fuente porque los rayos de luz de ordinario viajan en líneas (quebradas/curvas/rectas).
* * * * *

rectas

(bajo ciertas condiciones específicas, como veremos posteriormente al discutir la luz refractada y difractada, y en la cercanía de masas muy grandes como el Sol, la luz se desvía hacia trayectorias que *no son* "rectas" en el sentido ordinario de la palabra).

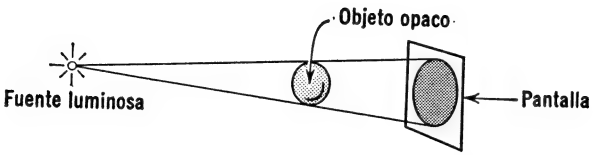
9. Usamos la expresión "propagación rectilínea" para describir el hecho de que la luz se propaga en línea recta a menos que sea reflejada, refractada o absorbida por algún objeto. La imagen en una cámara obscura depende de la .... de la luz.
* * * * *

propagación rectilínea

10. Si la trayectoria de la luz se curvara fácilmente alrededor de los objetos, los objetos ..... probablemente no arrojarían sombras.
* * * * *

opacos

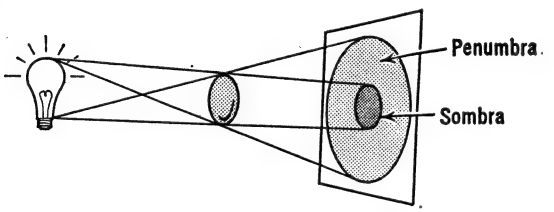
11.



Si la fuente luminosa es pequeña comparada con el objeto que ilumina, la sombra que proyecta dicho objeto tiene un contorno muy definido; esto se debe a la propagación ..... de la luz.
* * * * *

rectilínea (en línea recta)

12.



Si la fuente luminosa es más grande que el objeto opaco la sombra que proyecta el objeto *no es* definida; se produce una zona borrosa alrededor del borde de la sombra lo que en el diagrama anterior se llama .....
.....
* * * * *

penumbra

13. Vea el diagrama del marco anterior.

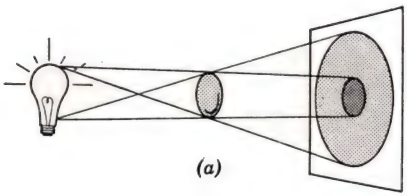
La zona de la pantalla en donde *no hay* luz es la que propiamente se llama .....
* * * * *

sombra.

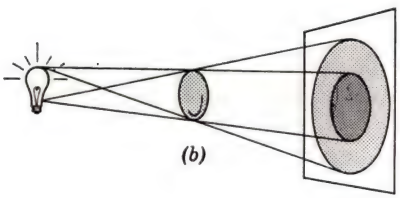
14. En el marco 11, la proyección en la pantalla constituye toda ella una (sombra/penumbra).
* * * * *

sombra

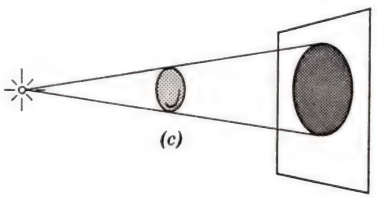
15.



(a)



(b)



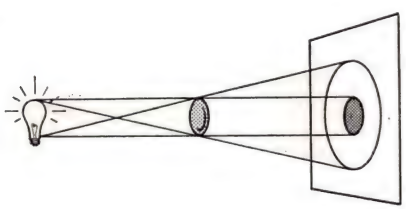
(c)

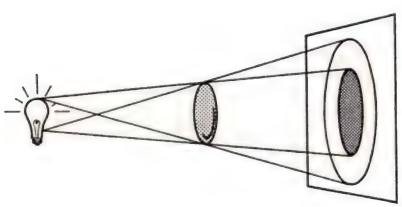
Al disminuir el tamaño de la fuente luminosa (decimos que se aproxima a una fuente *puntual),* debemos esperar que la penumbra (aumente/disminuya) y que la sombra (aumente/disminuya).

* * * * *

disminuya
aumente

16.





El tamaño de la penumbra depende de los tamaños relativos de la fuente de ..... y del objeto ..... que la proyecta. Si los ta-

maños relativos son tales que la penumbra que se forma es despreciable, decimos que la fuente de luz es una fuente .....
* * * * *

luz
opaco
puntual

17. Una fuente luminosa puntual forma únicamente (penumbra/sombra).
* * * * *

sombra

18. Consideramos como fuente puntual a aquella que es relativamente (grande/pequeña), comparada con el objeto que ilumina. Una fuente puntual ideal no produce (sombra/penumbra).
* * * * *

pequeña
penumbra

19. La imagen que se forma de una fuente luminosa en una cámara obscura y la sombra definida que forma una fuente puntual, son una comprobación de la .... de la luz.
* * * * *

propagación rectilínea

20. La luz no pasa a través de una manzana; por esta razón decimos que es un objeto ..... Vemos una manzana debido a la luz que refleja a nuestros ojos; por esta razón decimos que es un objeto .....
* * * * *

opaco
iluminado

21. De ordinario, las sombras consisten de una parte obscura central llamada propiamente ..... y una zona circundante o borde, menos obscura, llamada .....
* * * * *

sombra
penumbra

22. Repaso.
Cuando la penumbra es despreciablemente pequeña, decimos que la

sombra es producida por la presencia de un objeto ..... y una fuente luminosa .....

* * * * *

opaco
puntual

23. Repaso.

Cuando la Luna pasa entre la Tierra y el Sol, arroja sobre la Tierra (sombra y penumbra/sombra únicamente/penumbra únicamente). Explique.

* * * * *

sombra y penumbra
El Sol *no* es una fuente puntual; por lo tanto, produce sombra y penumbra.

24. Repaso.

Para una persona que esté en la zona de sombra el eclipse de Sol producido por la Luna es (parcial/total); para la persona que esté en la zona de penumbra el eclipse de Sol producido por la Luna es (parcial/total).

* * * * *

total
parcial

Sección 3. La rapidez de la propagación de la luz

1. Refiérase al panel 1. La letra que está en la esquina superior derecha es una .....

* * * * *

N (si no acertó es que se equivocó de panel).

2. Lea con cuidado el panel 1.

La Tierra alcanza su máxima cercanía a Júpiter cuando está en la posición ...., y alcanza su máxima distancia a Júpiter cuando está en la posición ..... El tiempo que emplea la Tierra en ir de una posición a la otra es de .... meses.

* * * * *

T_1; T_2; seis, ó 6.

3. Panel 1.

En seis meses la Tierra ha recorrido ..... (¿qué fracción?) de su órbita.

* * * * *

la mitad ó ½

4. Panel 1.
Esto significa que la distancia T_1T_2, en línea recta, es el(la) (radio/diámetro/circunferencia) de la órbita de la Tierra.
* * * * *
diámetro

5. Roemer observó desde T_2 que el eclipse real de la luna de Júpiter se (atrasó/adelantó) ..... segundos con respecto a sus pronósticos, basados en las observaciones iniciales, hechas desde .....
* * * * *
atrasó; 1000; T_1

6. Panel 1.
Roemer no encontró ninguna razón para atribuir su error a algún cambio en el período de revolución de la luna de Júpiter. Puesto que el error va disminuyendo conforme la Tierra se mueve de .... a ...., es razonable suponer que el error se debe al hecho de que la ..... ha estado moviéndose en su órbita entre las dos observaciones.
* * * * *
T_2; T_1; Tierra

7. El error observado varía desde 0 segundos en T_1 hasta 1000 segundos en T_2. La suposición más simple es que la distancia que la luz tiene que recorrer de Júpiter a la Tierra (es constante/varía) conforme la Tierra se mueve en su órbita.
* * * * *
varía

8. Panel 1.
Es lógico suponer que el tiempo que emplea la luz en ir de J_2 a T_2 sea (más largo que/más corto que/igual a) el tiempo que emplea en ir de J_1 a T_1.
* * * * *
más largo que

9. Panel 1.
Entonces, el error de 1000 seg en la predicción del eclipse observado desde T_2 debe representar el tiempo que la ..... emplea en recorrer una distancia aproximadamente igual al ..... de la órbita de la Tierra.
* * * * *
luz
diámetro

10. Rapidez $= \dfrac{\text{distancia}}{\text{tiempo}}$

c = rapidez de la luz

D = diámetro de la órbita de la Tierra

Usando estos símbolos y el error de tiempo observado por Roemer:

$$c = \frac{\qquad}{\qquad\qquad}$$

* * * * *

$$\frac{D}{1000 \text{ seg}}$$

11. El diámetro de la órbita de la Tierra es aproximadamente de 2.98×10^{11} m. Usando este valor y las observaciones de Roemer calcule la rapidez de la luz.

* * * * *

$$c = \frac{2.98 \times 10^{11} \text{ m}}{1000 \text{ seg}}$$

$$c = 2.98 \times 10^{8} \text{ m/seg}$$

12. El método de Roemer es sólo uno de los muchos usados para medir la rapidez de la luz. Una aproximación muy buena es 3×10^{8} m/seg en el vacío. Este valor debe memorizarse. La distancia aproximada entre el Sol y la Tierra es de 149×10^{9} metros. La luz del Sol emplea ..... en llegar a la Tierra.

* * * * *

$$\text{Tiempo} = \frac{\text{distancia}}{\text{rapidez}} = \frac{149 \times 10^{9} \text{ m}}{3 \times 10^{8} \text{ m/seg}} = 497 \text{ seg}$$

13. La rapidez de la luz varía de acuerdo con la substancia en que se propague. Su rapidez es máxima en el vacío donde $c =$ ..... m/seg.

* * * * *

3×10^{8}

14. Para uso práctico damos el mismo valor a la rapidez de la luz en el aire y en el vacío. Cuando usted enciende una lámpara que está a 1 m de distancia de usted, ¿cuánto tarda la luz de la lámpara en llegar a sus ojos? .....

* * * * *

$$\text{Tiempo} = \frac{1 \text{ m}}{3 \times 10^{8} \text{ m/seg}} = 0.3 \times 10^{-8}$$

o bien:

3×10^{-9} seg

15. Para medir distancias muy grandes los astrónomos emplean una unidad llamada *año-luz,* que es la distancia que recorre la luz en el espacio durante un año (365 días).

1 año-luz = ... metros.

* * * * *

$$\left(365\,\frac{\text{días}}{\text{año}}\right)\left(24\,\frac{\text{horas}}{\text{día}}\right)\left(3600\,\frac{\text{seg}}{\text{hora}}\right)\left(3\times10^{8}\,\frac{\text{m}}{\text{seg}}\right)$$

$= 9.5 \times 10^{15}$ metros

Sección 4. Medida de la intensidad luminosa; La bujía patrón; Iluminancia; $E = \dfrac{I}{d^2}$

1. Algunos objetos luminosos emiten más luz que otros. El Sol tiene una intensidad luminosa (mayor/menor) que la de un foco de lámpara de bolsillo.

* * * * *

mayor

2. Para medir la intensidad luminosa tenemos que definir una unidad. La unidad es la *bujía patrón* (o, más brevemente, *bujía).* Una fuente con una intensidad luminosa de 25 bujías, es 25 veces (más/menos) intensa que la .....

* * * * *

más
bujía patrón

3. Definimos la bujía patrón como 1/60 de la intensidad luminosa de la luz que emite 1 cm^2 de una superficie de platino incandescente mantenido a una temperatura constante de 1763°C. Un cm^2 de tal superficie tiene una intensidad luminosa de ..... *(número y unidades).*

* * * * *

60 bujías
(generalmente no se usa el término "patrón" y nos referimos solamente a "bujías" como la unidad).

4. Usamos la bujía patrón para medir la cantidad física llamada ....

* * * * *

intensidad luminosa

5. Lea de nuevo la definición dada en el marco 3.

Definimos la bujía patrón en función de la luz emitida por 1 cm^2 de una superficie de platino ..... mantenido a ..... constante.

* * * * *

incandescente
temperatura

6. No obstante que definimos a la bujía patrón en función de la intensidad luminosa de cierta área de una superficie de platino *incandescente,* la usamos para medir la intensidad luminosa de *cualquier* objeto luminoso. Esto significa que la intensidad luminosa de una lámpara fluorescente (también es/no es) susceptible de medirse en bujías patrón.

* * * * *

también es

7. La luz de una luciérnaga (es/no es) una fuente incandescente. La intensidad luminosa de la luz de una luciérnaga se mide en .....
.....

* * * * *

no es
bujías patrón

8. Se llama fuente puntual a la fuente luminosa que es pequeña comparándola con el área que ilumina. Una lámpara eléctrica que ilumina un gran auditorio (es/no es) una fuente puntual.

* * * * *

es

9. La intensidad luminosa de la flama de una vela es (mayor/menor) que la del foco de una lámpara de la calle. Si se coloca una superficie a la misma distancia de estas dos fuentes, recibe (más/menos) iluminación de la lámpara de alumbrado público.

* * * * *

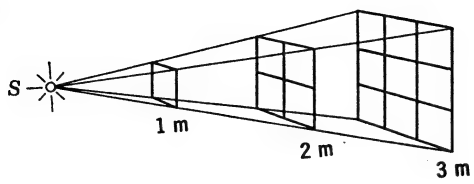
menor
más

10. La iluminación de una superficie se llama iluminancia; es la cantidad de luz que incide sobre la unidad de área a una distancia dada de la fuente. La iluminancia (E) es (directamente/inversamente) proporcional a la intensidad luminosa de la fuente.

* * * * *

directamente

11.



S es una fuente puntual. La luz de *S* debe cubrir al área que está a 2 metros de distancia de la fuente ..... veces el área que está a 1 m de distancia.

* * * * *

4 ó cuatro

12. Refiérase al diagrama del marco anterior.

La luz de *S* debe iluminar al área que está a 3 m de distancia ..... veces el área que está a 1 m de distancia.

* * * * *

3^2 ó 9 ó nueve

13. En otras palabras, la luz que se reparte sobre una unidad de área que está a 1 m de distancia de la fuente tiene que repartirse sobre 4 unidades de área cuando ésta se encuentra a 2 m de distancia de la fuente. A 2 m de distancia de la fuente la iluminancia es ..... (fracción) de la proporcionada a 1 m de distancia.

* * * * *

$\frac{1}{2^2}$ ó $\frac{1}{4}$ ó un cuarto

14. La iluminancia que suministra una fuente puntual a 3 m de distancia es ..... (fracción) de la iluminancia que proporciona esa misma fuente, cuando se coloca a 1 m de distancia.

* * * * *

$\frac{1}{3^2}$ ó $\frac{1}{9}$ ó un noveno

15. Se sitúan dos fuentes puntuales, una de 10 bujías y otra de 30 bujías, a 5 m de una pantalla. La iluminación proporcionada por la fuente de 10 bujías es ..... (fracción) de la que suministra la fuente de 30 bujías.

* * * * *

⅓ ó un tercio

16. La iluminancia es la cantidad de luz que incide en una unidad de área. Es (directamente/inversamente) proporcional a la intensidad luminosa de la fuente y (directamente/inversamente) proporcional al ..... de la distancia que hay a la fuente.

* * * * *

directamente; inversamente; cuadrado

17. La iluminancia que suministra una fuente puntual de luz es directamente proporcional a su ....

* * * * *

intensidad luminosa

18. La iluminancia de una fuente puntual de luz es inversamente proporcional al ..... de la ..... que la separa del objeto que está iluminando.

* * * * *

cuadrado
distancia

19. E = iluminancia
I = intensidad luminosa
d = distancia de la fuente puntual a la superficie iluminada
Suponiendo una constante de proporcionalidad igual a uno, $E =$ .....

* * * * *

$$\frac{I}{d^2}$$

20. Se coloca una pantalla a 5 m de una fuente puntual de 100 bujías. La iluminancia es $E =$ ..... *bujías-metro* o *luxes.*

* * * * *

$$E = \frac{I}{d^2} = \frac{100}{(5)^2} = \frac{100}{25} = 4$$

21. Si se coloca una pantalla a 1 m de distancia de una fuente puntual de 1 bujía la iluminancia es: 1 ..... (unidad).

* * * * *

lux (o bujía-metro, o bujía-m)

22. La iluminancia que suministra a 20 m de distancia una lámpara de alumbrado público es de 6.25 luxes (bujías-m). La intensidad luminosa de la lámpara es de ..... bujías.

* * * * *

$$E = \frac{I}{d^2}$$

$$6.25 = \frac{I}{(20)^2}$$

$I = (400)(6.25) = 2500$ bujías

23. La *bujía* es una unidad para medir (intensidad luminosa/iluminancia). El lux o bujía-metro es una unidad para medir (intensidad luminosa/iluminancia).

* * * * *

intensidad luminosa; iluminancia

24. Para medir la cantidad de luz que ilumina a una superficie, se emplean (bujías/luxes).

* * * * *

luxes.

Sección 5. Repaso y problemas

1. El fotómetro es un dispositivo para medir la iluminancia que suministra una fuente luminosa a una distancia dada de la fuente. Por lo tanto, es probable que un fotómetro esté calibrado en (bujías/luxes).

* * * * *

luxes

2. El fotómetro mide *directamente* (intensidad luminosa/iluminancia).

* * * * *

iluminancia

3. Se coloca un fotómetro a 10 m de una fuente de 40 bujías. Debe indicar ..... luxes (bujías-m).

* * * * *

$$E = \frac{I}{d^2} = \frac{40 \text{ bujías}}{(10 \text{ m})^2} = \frac{40}{100} = 0.4 \text{ lux}$$

4. Cuando se coloca un fotómetro a 5 m de una fuente puntual de luz, indica 2 luxes.

$$E = \frac{I}{d^2}$$

En este caso, $E =$ ..... (número y unidades)
$d =$ ..... (número y unidades)
$I =$ ..... (número y unidades)

* * * * *

$E = 2$ luxes

$d = 5$ metros

$$E = \frac{I}{d^2}$$

$$2 \text{ luxes} = \frac{I}{(5 \text{ m})^2}$$

$I = 50$ bujías

5. El fotómetro se usa para medir (directamente/indirectamente) iluminación. Se puede usar para medir (directamente/indirectamente) intensidad luminosa.

* * * * *

directamente
indirectamente

6. Se coloca un fotómetro a 4 m de una fuente puntual que tiene una intensidad luminosa de 64 bujías. La lectura en el fotómetro es de ..... luxes.

* * * * *

$$E = \frac{I}{d^2} = \frac{64}{(4)^2} = 4 \text{ luxes}$$

7. Cuando colocamos un fotómetro a 10 m de una fuente luminosa puntual indica 3.6 luxes. La intensidad luminosa de la fuente es de .... *(número y unidades).*

* * * * *

$$E = \frac{I}{d^2}$$

$$3.6 = \frac{I}{(10)^2}$$

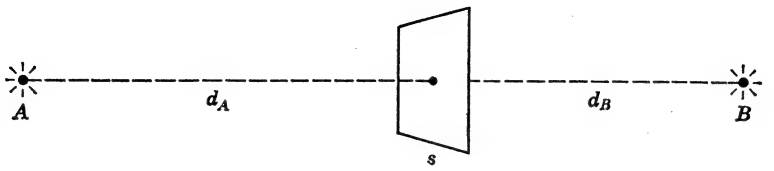
$I = (100)(3.6) = 360$ bujías

8. Cuando se coloca un fotómetro a 10 m de una fuente luminosa *A* indica 0.5 lux. Cuando se coloca a 2 m de otra fuente luminosa *B* también indica 0.5 lux. (*A*/*B*) tiene una intensidad luminosa mayor.

* * * * *

A (porque proporciona, a mayor distancia, la misma iluminación que *B*)

9.



Las fuentes A y B iluminan al mismo tiempo la pantalla s. Un fotómetro indica *la misma* iluminación en ambos lados de la pantalla.

$E_A = \dfrac{I_A}{d_A^2}$ y $E_B = \dfrac{I_B}{d_B^2}$

En este caso, $E_A = E_B$, y: ..... = ... (use símbolos: I_A, d_A, I_B, d_B).

* * * * *

$$\frac{I_A}{d_A^2} = \frac{I_B}{d_B^2}$$

10. Refiérase a la figura del marco anterior.

$$\frac{I_A}{d_A^2} = \frac{I_B}{d_B^2}$$

Esta ecuación es correcta porque las iluminaciones que suministran A y B a la pantalla son (iguales/desiguales).

* * * * *

iguales

11. La fuente A produce a la distancia d_1 la misma iluminación que B a la distancia d_2.

Esto significa que $\dfrac{I_A}{d_1^2}$ = ..., o bien: $I_A d_2^2$ = ...

* * * * *

$\dfrac{I_B}{d_2^2}$; $I_B d_1^2$

12. Un fotómetro da la misma lectura a 3 m de una lámpara de 9 bujías que a 2 m de una fuente de intensidad luminosa desconocida. Calcule la intensidad luminosa de la fuente desconocida.

* * * * *

$$\frac{I}{(2\text{ m})^2} = \frac{9\text{ bujías}}{(3\text{ m})^2}$$

$I = 4$ bujías

13. Una lámpara de 25 bujías produce a una distancia de 10 m la misma iluminación que produce una fuente de 4 bujías a ..... m.

* * * * *

$$\frac{25 \text{ bujías}}{(10 \text{ m})^2} = \frac{4 \text{ bujías}}{X^2}$$

$$X^2 = \frac{(4 \text{ bujías})\,(100 \text{ m}^2)}{25 \text{ bujías}}$$

$$X^2 = 16 \text{ m}^2$$

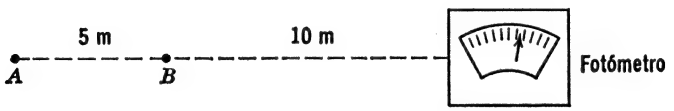
$$X = 4 \text{ m}$$

14. Se coloca un fotómetro a 10 m de una fuente de 5 bujías. Su lectura, en luxes (bujías-m) debe ser de .....

* * * * *

$$E = \frac{I}{d^2} = \frac{5}{100} = .05 \text{ lux}$$

15.



Se coloca en *A* una fuente de 22.5 bujías y en *B* una de 62.5 bujías. La lectura del fotómetro es de ..... luxes.

* * * * *

$$E_A = \frac{22.5}{15^2} = \frac{22.5}{225} = .1 \text{ lux}$$

$$E_B = \frac{62.5}{10^2} = \frac{62.5}{100} = .625 \text{ lux}$$

Iluminación total = .1 + .625 = .725 lux

16. Repaso.

¿Cuáles de los siguientes objetos son luminosos y cuáles iluminados?

(a) la flama de un mechero Bunsen.
(b) esta página impresa.
(c) una lámpara fluorescente apagada
(d) un filamento incandescente
(e) el Sol
(f) un cerillo apagado
(g) una luciérnaga resplandeciendo

* * * * *

(a) luminoso
(b) iluminado
(c) iluminado
(d) luminoso
(e) luminoso
(f) iluminado
(g) luminoso

17. Repaso.

Identifique como incandescentes o como luminiscentes las siguientes fuentes luminosas:

(a) una lámpara fluorescente
(b) el resplandor de una luciérnaga
(c) el Sol
(d) la flama de un mechero Bunsen
(e) el filamento de un foco

* * * * *

(a) luminiscente
(b) luminiscente
(c) incandescente
(d) incandescente
(e) incandescente

18. Repaso.

La nitidez de la sombra que arrojan los objetos iluminados por una fuente luminosa puntual y la imagen que forman los objetos luminosos en una cámara obscura son pruebas de la .... de la luz.

* * * * *

propagación rectilínea

19. Repaso.

La rapidez de propagación de la luz en el espacio es de .... m/seg.

* * * * *

3×10^8

20. Repaso.

¿Qué distancia recorre la luz en el espacio en 2.5 seg?

* * * * *

$(2.5 \text{ seg})\,(3 \times 10^8 \text{ m/seg}) = 7.5 \times 10^8 \text{ m}$

21. Repaso

La intensidad luminosa de una fuente de luz se mide en .....

* * * * *

bujías

22. Repaso.

La iluminación que suministra una fuente puntual luminosa es (directamente/inversamente) proporcional a (la intensidad/el cuadrado de la intensidad) y (e) (directamente/inversamente) proporcional a (la distancia/el cuadrado de la distancia).

* * * * *

directamente
la intensidad
inversamente
el cuadrado de la distancia

23. Repaso.

Sea I la intensidad luminosa de una fuente puntual de luz y E la iluminación que suministra a una distancia r. Escriba una ecuación para E en función de I y r.

* * * * *

$$E = \frac{I}{r^2}$$

24. Repaso.

Una fuente puntual de luz suministra a 2 m una iluminación de 20 luxes. ¿Qué iluminación proporciona a 5 m?

* * * * *

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{{d_2}^2}{{d_1}^2}$$

$$\frac{20}{E_2} = \frac{(5\text{ m})^2}{(2\text{ m})^2}$$

$$25E_2 = (20)(4)$$

$$E_2 = {}^{80}\!/_{25} = 3.2 \text{ luxes}$$

25. Repaso.

Una fuente de 100 bujías proporciona a 2 m de distancia la misma iluminación que suministra otra de potencia desconocida a 5 m de distancia. ¿Cuál es la potencia en bujías de la fuente desconocida?

* * * * *

$$\frac{100 \text{ bujías}}{(2\text{ m})^2} = \frac{I}{(5\text{ m})^2}$$

$$I = \frac{(25\text{ m})\,(100 \text{ bujías})}{4\text{ m}} = 625 \text{ bujías}$$

26. ¿A qué distancia proporciona una fuente de 1000 bujías la misma iluminación que suministra a 1 m una fuente de 10 bujías?

* * * * *

$$\frac{1000 \text{ bujías}}{d^2} = \frac{10 \text{ bujías}}{(1\text{ m})^2}$$

$$d^2 = 100\text{ m}^2$$

$$d = 10\text{ m}$$

PROBLEMAS

1. ¿A qué distancia de la Tierra está la estrella más próxima de la constelación Alfa del Centauro, en kilómetros, si se encuentra a 4 años-luz?

2. ¿Cuánto tarda la luz del Sol en llegar a la Tierra? (El Sol está a 1.49×10^8 km de la Tierra.)

3. ¿Cuánta luz emite un filamento de platino que está a 1763°C y cuya superficie tiene un área de 0.1 cm^2?

4. ¿Cuánta iluminación incide en una superficie que está a 9 m de una fuente de 12 bujías?

5. Una lámpara eléctrica de 25 watts emite 25 bujías. ¿Qué iluminación suministra a una mesa que está a 5 m bajo la lámpara?

6. Si una lámpara de alumbrado público que está a 6 m de altura del pavimento suministra una iluminación de 8 luxes, ¿cuál es la intensidad luminosa de la lámpara?

7. Se coloca un fotómetro a 16 m de una fuente de 20 bujías. ¿Cuántos luxes debe indicar la aguja del fotómetro?

8. Un reflector de 16 luxes ilumina una pista de patinaje desde una altura de 20 m. ¿Cuál es la intensidad luminosa del reflector?

9. Una pantalla translúcida se ilumina igualmente por ambos lados; una lámpara de 10 bujías está a 10 m de distancia, y la otra está a 5 m. ¿Qué cantidad de luz emite la fuente que está a 5 m de la pantalla?

10. Se coloca un fotómetro a 4 m de una lámpara de 16 bujías y da la misma lectura que dio al colocar una fuente de luz desconocida a 3 m del mismo. ¿Cuál es la intensidad luminosa de la fuente desconocida?

11. ¿A qué distancia de una pantalla colocaría usted una fuente de 5 bujías para dar la misma iluminación que una lámpara de 20 bujías situada a 8 m de dicha pantalla?

12. ¿Qué lectura debe dar un fotómetro de precisión que se coloca a 8 m de una fuente de 8 bujías?

13. Se coloca una fuente de 20 bujías a 8 m de un fotómetro; alineado con ellos se coloca otra fuente de 20 bujías a 4 m de distancia de la primera fuente. ¿Qué lectura da el fotómetro?

14. ¿A qué distancia de una pantalla suministra una lámpara de 54 bujías la misma iluminación que da una de 75 bujías a 15 m de la pantalla?

15. ¿Qué tanto se debe bajar una lámpara de 60 bujías para duplicar la iluminación que proporciona a 4 m?

16. Una lámpara de 10 bujías se encuentra a 100 cm de otra de 30 bujías. ¿En qué punto entre ellas producen la misma iluminación?

17. Suponga que un reflector esférico para lámpara tenga una eficiencia de un 100%. ¿Qué iluminación dará sobre una pantalla que esté a 10 m de distancia, una lámpara de proyector de 500 bujías-m?

CAPITULO 2

REFLEXION DE LA LUZ

OBJETIVOS:

Al terminar el estudio de este capítulo el estudiante debe ser capaz de:

1. Distinguir entre las reflexiones regular y difusa.
2. Enunciar las leyes de la reflexión regular.
3. Describir y situar una imagen en un espejo plano.
4. Aplicar los conceptos de rayos incidente, reflejado y normal a las superficies curvas.
5. Describir las imágenes que forman los espejos esféricos cóncavos y convexos a varias distancias de sus vértices.
6. Usar la fórmula de los espejos para situar imágenes, focos y objetos en los espejos esféricos.
7. Describir el defecto de aberración esférica en los espejos esféricos e indicar las ventajas del espejo parabólico sobre el esférico.

NOTA PRELIMINAR

En el capítulo 1 nos iniciamos cualitativamente en la ciencia de la óptica con base en ciertas propiedades y conceptos empleados para describir los fenómenos ópticos; también estudiamos la rama de la óptica llamada fotometría, que comprende la medida *cuantitativa* de la intensidad de la luz y de la iluminación que suministran distintas fuentes sobre las superficies a distancias variables de la fuente.

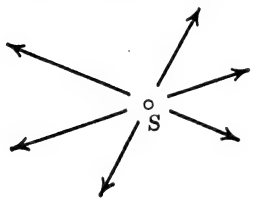
En los capítulos 2 y 3 continuaremos este estudio cuantitativo. Estos dos capítulos constituyen en conjunto lo que a menudo se le llama *óptica geométrica* porque se basa principalmente en la comparación de los "rayos" de luz con las líneas rectas dirigidas que en geometría se llaman *rayos*.

Los principios y las ecuaciones básicos de la reflexión y la refracción se deducen de sencillas relaciones geométricas (y trigonométricas) entre los rayos de luz incidente y reflejado e incidente y refractado. La óptica geométrica explica mucho de lo que sabemos acerca de los fenómenos de la reflexión en los espejos planos y en los curvos. La imagen que

refleja su mirada en el espejo del baño en la mañana es producto de la óptica geométrica; las imágenes deformadas que se ven en los espejos curvos que hay en los parques de diversión y que provocan risa también se explican mediante sencillos principios geométricos.

Sección 1. Los rayos, los haces, los rayos incidente y reflejado, la reflexión regular y la difusa.

1. Es conveniente imaginarse que la luz parte de una fuente en forma de un número muy grande de *rayos*.



En esta figura las flechas representan ..... de luz que parten de *S*.

* * * * *

rayos

2.

Los rayos de luz que parten de una misma fuente puntual (son/no son) paralelos. No obstante, a medida que se alejan de su fuente, por ejemplo, más allá de la línea de trazos de la figura aparentan ser (más/menos) paralelos.

* * * * *

no son (puesto que deben intersectarse en su fuente común)
más

3. Un conjunto de rayos de luz paralelos (o casi paralelos) constituye un *haz* de luz.

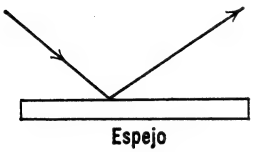
Para el estudio de ciertos fenómenos ópticos hemos encontrado conveniente considerar a la luz que parte de una fuente como un número infinito de partículas que viajan en línea recta. Llamamos ..... de luz a la trayectoria que sigue cada una de esas partículas imagina-

rias. Se llama ..... de luz a un grupo de tales partículas que recorren trayectorias (casi) paralelas.

* * * * *

rayo
haz

4. La reflexión es uno de los fenómenos ópticos que pueden estudiarse usando los rayos. Los rayos (y los haces) de luz rebotan en ciertas superficies como, por ejemplo, los espejos.

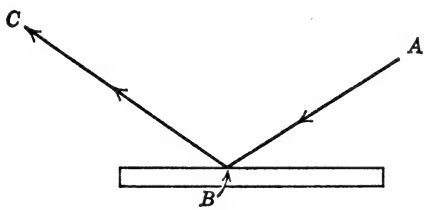


Al rayo que llega al espejo lo llamamos *incidente;* al rayo que parte del espejo lo llamamos .....

* * * * *

reflejado

5.

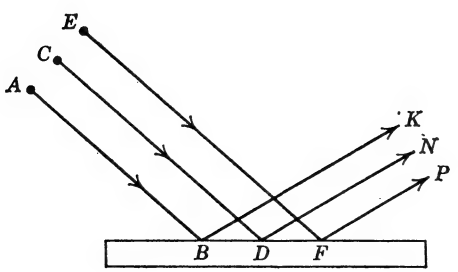


Observe las flechas. *BC* es el rayo (incidente/reflejado); *AB* es el (incidente/reflejado).

* * * * *

reflejado
incidente

6

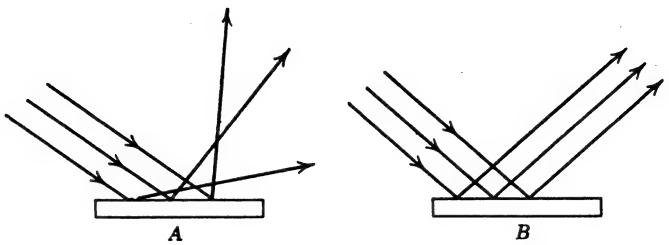


AB, *CD* y *EF* constituyen un haz de luz incidente; *BK*, *DN* y *FP* constituyen un haz .....

* * * * *

reflejado

7

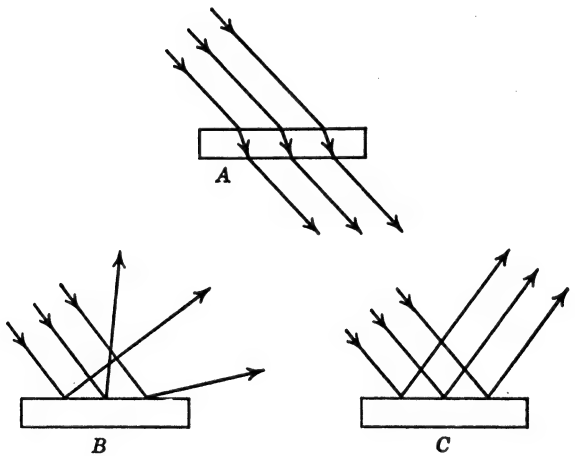


La reflexión *regular* ocurre cuando un haz de rayos paralelos se refleja como haz de rayos paralelos. ¿Cuál de las figuras anteriores ilustra la reflexión regular? (*A*/*B*).

* * * * *

B

8

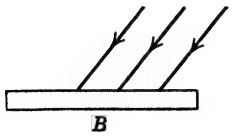


Cuando un haz de rayos paralelos se refleja en todas direcciones tenemos la reflexión difusa. De las figuras anteriores, ¿cuál ilustra la reflexión regular?; (*A*/*B*/*C*); ¿cuál ilustra al difusa?: (*A*/*B*/*C*).

* * * * *

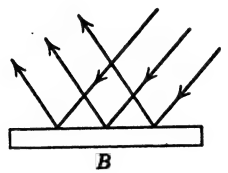
C
B

9. La reflexión regular se presenta cuando la luz se refleja en una superficie pulida como la de un espejo, una placa metálica, etc.



B es una superficie pulida. Dibuje el haz reflejado.

* * * * *

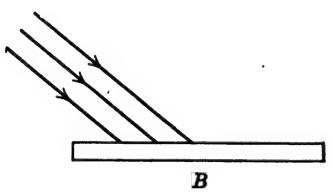


10. La luz reflejada en una placa de plata pulida es un ejemplo de reflexión .....

* * * * *

regular

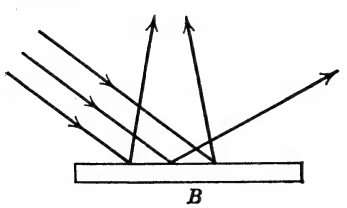
11. La luz reflejada en una superficie áspera tal como la de un muro de concreto, la de un vidrio esmerilado, etc., es un ejemplo de reflexión .....



Suponga que *B* es una losa de concreto. Dibuje los rayos reflejados.

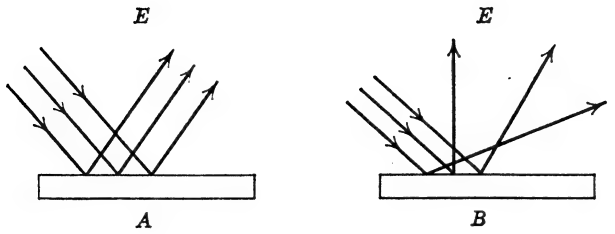
* * * * *

difusa



(éste es un ejemplo de respuesta correcta; sólo es necesario que los rayos reflejados *no sean paralelos).*

12.



¿En qué caso el ojo situado en *E* ve luz reflejada en él?: (*A*/*B*). Lo (más/menos) probable es que estemos en una posición en la que nuestros ojos reciban luz reflejada difusamente.

* * * * *

B
más

13. Sobre una superficie inciden rayos de luz paralelos; de esta misma superficie parten también paralelos. Este es un ejemplo de reflexión .....

Sobre una superficie inciden rayos paralelos de luz; de esta misma superficie se reflejan en direcciones no paralelas. Este es un ejemplo de reflexión .....

* * * * *

regular
difusa

14. Usted ve un trozo de tiza por la luz que ..... a sus ojos; por lo tanto, es un objeto (luminoso/iluminado).

Comparada con la superficie de un espejo, la de la tiza es áspera y tosca; la luz que refleja a nuestros ojos la tiza es resultado de la reflexión (regular/difusa).

* * * * *

refleja
iluminado
difusa

15. Usted puede ver en un espejo la imagen de un trozo de tiza; esto se debe a la reflexión (regular/difusa) del espejo.

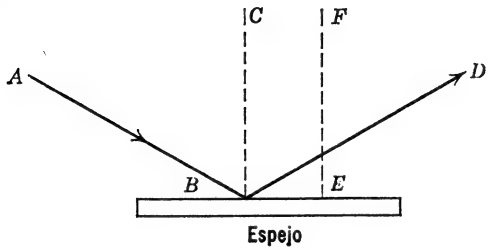
La luz se refleja (regularmente/difusamente) de la tiza al espejo.

* * * * *

regular
difusamente

Sección 2. Leyes de la reflexión

1.

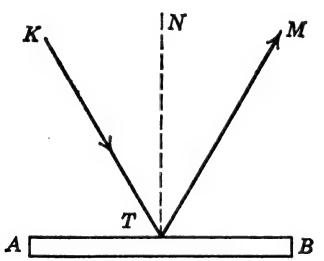


A la línea imaginaria *perpendicular* a una superficie reflectora en el punto donde incide un rayo de luz se le llama *normal* a la superficie en ese punto. En esta figura la normal es (*AB*/*BC*/*BD*/*EF*).

* * * * *

BC

2.

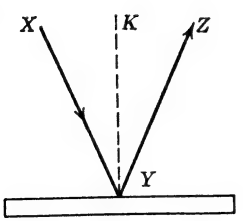


NT es normal a *AB* en el punto *T*. El ángulo *NTB* es de ..... grados.

* * * * *

90

3.



Identifique en esta figura: *(a)* el rayo incidente, *(b)* el rayo reflejado y *(c)* la normal.

* * * * *

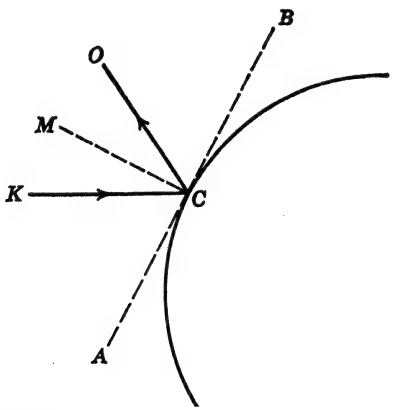
(a) XY (b) YZ (c) YK

4. Si incide un rayo de luz en una superficie plana, la normal trazada en el punto de incidencia forma un ángulo de ..... grados con la superficie reflectora.

* * * * *

90

5.



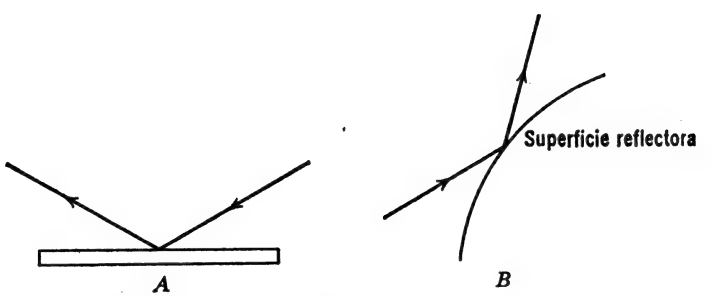
Si incide un rayo de luz en una superficie *curva,* la normal trazada en el punto de incidencia es perpendicular a la tangente a la superficie curva en ese punto. Identifique en esta figura lo siguiente (escoja entre *AB, MC, OC* y *KC*):

(1) la tangente (2) el rayo incidente
(3) la normal (4) el rayo reflejado.

* * * * *

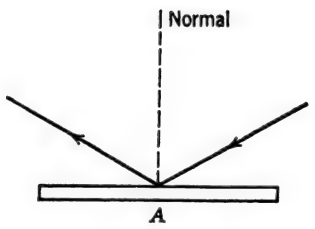
(1) *AB* (3) *MC*
(2) *KC* (4) *OC*

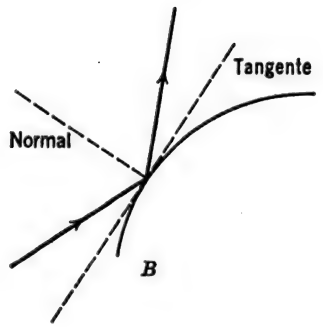
6.



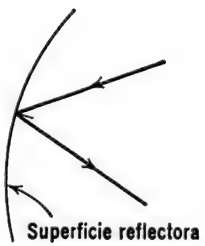
Trace las normales en *A* y en *B.*

* * * * *



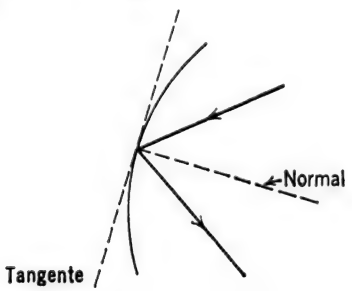


7.



Trace la normal a la superficie reflectora en el punto de incidencia en esta figura.

* * * * *



(Ud. debe haber trazado primero la tangente y después la normal, perpendicular a ella.)

8. La primera ley de la reflexión afirma que el rayo incidente, la normal y el rayo reflejado están en el mismo plano. Por consiguiente, si los rayos incidente y reflejado están en el plano de esta página la normal (está/no está) en el plano de la página.

* * * * *

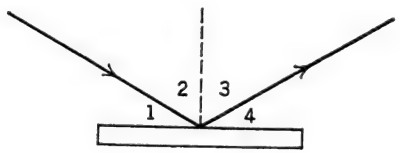
está

9. La primera ley de la reflexión afirma que los rayos ..... y ..... están (en un plano perpendicular al de la normal/en el mismo plano de la normal).

* * * * *

en cualquier orden: incidente, reflejado
en el mismo plano de la normal.

10. Se llama ángulo de incidencia el que forman el rayo incidente y la normal.

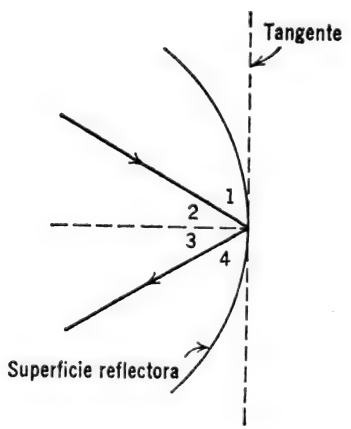


¿Cuál es aquí el ángulo de incidencia? (1, 2, 3 ó 4).

* * * * *

2

11.

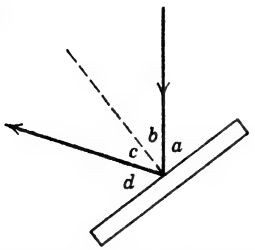


En esta figura el ángulo de incidencia es el (1/2/3/4).

* * * * *

2

12.

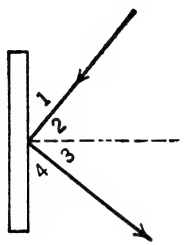


El ángulo que forma el rayo reflejado y la normal es el ángulo de reflexión. En la figura, el ángulo de reflexión es (*a*/*b*/*c*/*d*). El ángulo de incidencia es (*a*/*b*/*c*/*d*).

* * * * *

c
b

13.



La segunda ley de la reflexión afirma que en la reflexión regular el ángulo de incidencia es igual al de reflexión. Esto significa que, en la figura, debe verificarse lo siguiente:

(a) $\angle 1 = \angle 3$
(b) $\angle 3 = \angle 2$ } Escoja *(a)*, *(b)* o *(c)*.
(c) $\angle 4 = \angle 2$

(el símobolo $\angle$ significa ángulo)

* * * * *

(b)

14. La primera ley de la reflexión afirma que el rayo incidente, el reflejado y la normal están ..... *(complete)*.

* * * * *

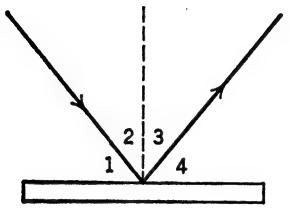
en el mismo plano

15. La segunda ley de la reflexión regular afirma que el ángulo de incidencia ..... *(complete)*.

* * * * *

es igual al ángulo de reflexión

16.



En la figura, $\angle 1 + \angle 2 =$ ..... grados. Si $\angle 2 = 50°$, $\angle 3 =$ ..... grados y $\angle 4 =$ ..... grados.

* * * * *

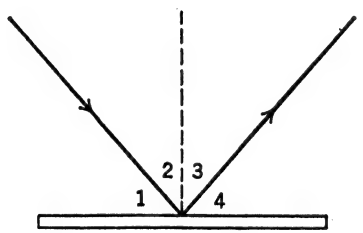
90; 50; 40

17. Refirámonos a la figura del marco anterior.
Si $\angle 1 = 30°$, entonces $\angle 3 =$ ..... grados.

* * * * *

60° (puesto que $\angle 2 = 60°$)

18.

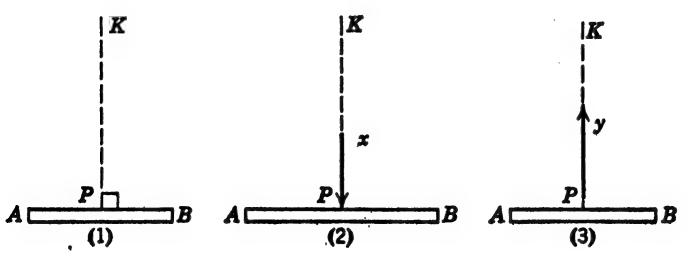


$\angle 1 = 30°$
El ángulo de incidencia es de ..... grados.
El ángulo de reflexión es de ..... grados.

* * * * *

60; 60

19.



La Fig. 1 muestra la normal *KP* a la superficie reflectora en *P*. En la Fig. 2, un rayo de luz *x* que se mueve a lo largo de la normal incide en *AB* y, por lo tanto, el ángulo de incidencia es de .... grados. *(¡Medite!* ¿cómo se define el ángulo de incidencia?)

* * * * *

cero (porque el ángulo que forma el rayo incidente con la normal es de cero grados).

20. Refirámonos a la Fig. 3 del marco anterior. *y* es el rayo reflejado por *AB*, mientras que *x* es el incidente a ésta en *P*. El ángulo de reflexión es de ..... grados. Explique su respuesta.

* * * * *

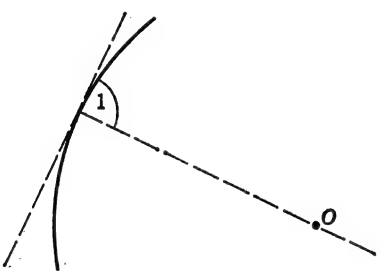
cero (porque el ángulo de reflexión se define como el que forma la normal y el rayo refractado).

21. Un rayo de luz que incide en la superficie de un espejo a un ángulo de 90° *con el espejo,* tiene un ángulo de reflexión igual a ..... grados. ¿Por qué?

* * * * *

cero (porque su ángulo de incidencia es cero, o bien, porque es reflejado a lo largo de la normal a la superficie).

22. De sus estudios de geometría usted recordará que toda recta que pase por el centro de un círculo y por el punto de contacto de una tangente, será perpendicular a la tangente.

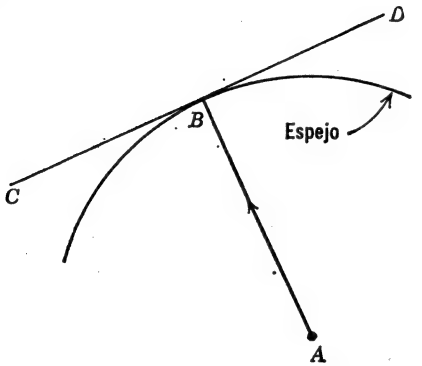


En esta figura, $\angle 1 =$ ..... grados.

* * * * *

90

23.

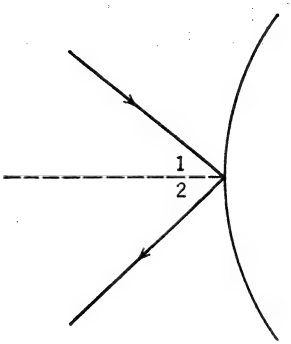


Si *AB* es un rayo de luz que toca al espejo curvo su ángulo de incidencia es de .... grados y su ángulo de reflexión es de ..... grados. El rayo de luz (se/no se) refleja pasando por el centro *A*.

* * * * *

cero
cero
se

24.

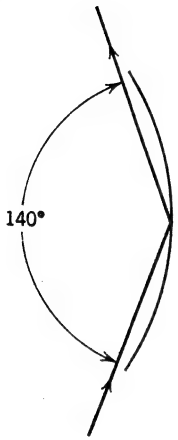


∠1 es el ángulo de .....
∠2 es el ángulo de .....
Si ∠1 = 25°, ∠2 = ...°

* * * * *

incidencia
reflexión
25°

25.



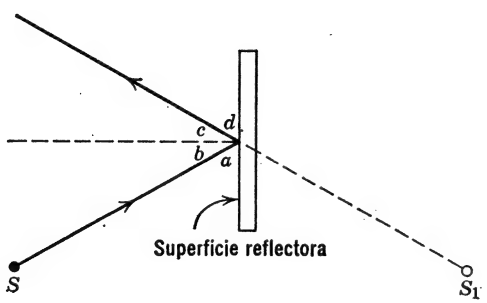
El ángulo que hay entre los rayos incidente y reflejado es de 140°. El ángulo de incidencia es de ..... grados.

* * * * *

70

Sección 3. Imágenes en un espejo plano

1.



La luz que parte de S es reflejada al ojo sólo por aquellos rayos cuyo $\angle b = \angle \ldots$.

* * * * *

c

2. Refirámonos a la figura del marco anterior.
La luz de S reflejada en el espejo parece llegar al ojo desde (S/S_1).

La imagen que vemos en un espejo plano parece estar (frente a/detrás de) la superficie reflectora.

* * * * *

S_1
detrás de

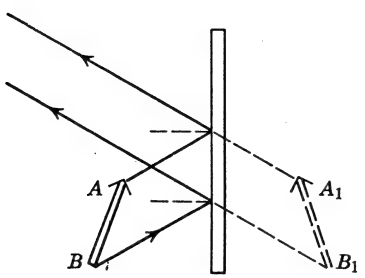
3. Vea la figura del marco 1.

La luz de una imagen que se ve en un espejo plano no puede venir realmente de detrás del espejo porque éste es un objeto (transparente/opaco). A S_1 se le llama imagen virtual de S. La fuente luminosa *real* es (S/S_1); la fuente virtual es (S/S_1).

* * * * *

opaco; S; S_1

4.

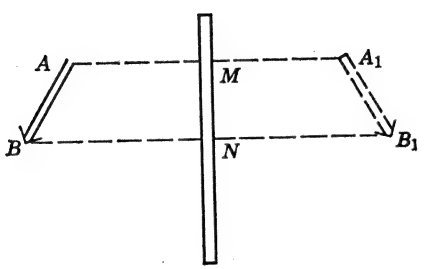


A_1B_1 es la imagen (real/virtual) de AB.

* * * * *

virtual

5.



A_1B_1 es la imagen de AB en un espejo *plano*. La medición indica que A está frente a la superficie reflectora a la misma distancia que A_1 parece estar detrás de ella. En otras palabras, AM ..... A_1M.

* * * * *

= (o igual a)

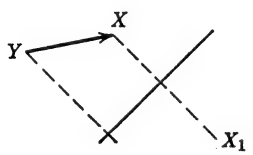
6. Vea la figura del marco anterior.
BN $(=/\neq)$ B_1N.
* * * * *
=

7. Cuando usted camina hacia un espejo plano su imagen se (acerca al/aleja del) espejo.
* * * * *
acerca al

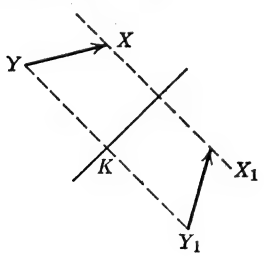
8. Cuando usted se aleja de un espejo plano su imagen se (acerca al espejo/aleja de él a medida que usted camina).
* * * * *
aleja de él a medida que usted camina.

9. La imagen virtual está detrás de un espejo ..... a la misma distancia a que está el objeto ante él.
* * * * *
plano

10. Lo anterior nos da un método conveniente para situar la imagen de un objeto en un espejo plano. Complete la imagen de XY que está en seguida:



* * * * *
mida: $Y_1K = YK$



11. Considere su imagen en un espejo plano. Cuando usted se toca su oreja izquierda, su imagen se toca su oreja (derecha/izquierda).
* * * * *
derecha

12. Cuando usted levanta su mano derecha su imagen levanta su mano (derecha/izquierda).

* * * * *

izquierda

13. Cuando usted guiña su ojo derecho su imagen le guiña con su ojo (derecho/izquierdo).

* * * * *

izquierdo

14. Se llama *inversión lateral* a esta propiedad de las imágenes en los espejos planos. La imagen de un espejo plano es (real/virtual), está invertida .....mente y a una distancia detrás del espejo igual a ..... *(complete).*

* * * * *

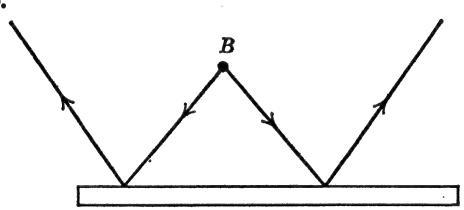
virtual
lateral(mente)
la del objeto que está frente a él.

15. Se dice que la imagen de un objeto en un espejo plano está .... lateralmente.

* * * * *

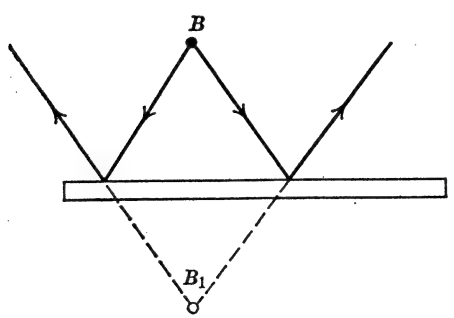
invertida

16.

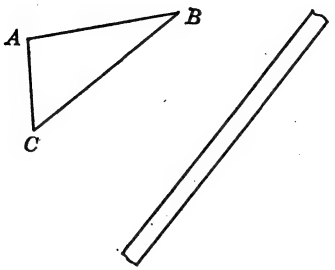


B es un objeto. Construya su imagen (B_1) en el espejo usando los rayos que se indican.

* * * * *

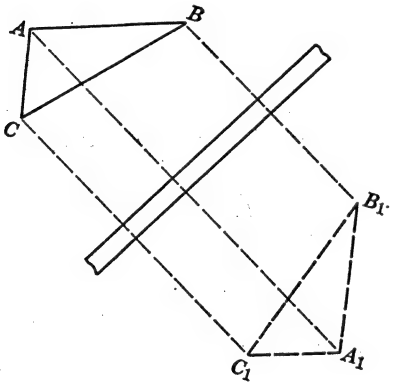


17.



Construya la imagen de *ABC* en este espejo. Rotúlela: A_1, B_1, C_1.

* * * * *



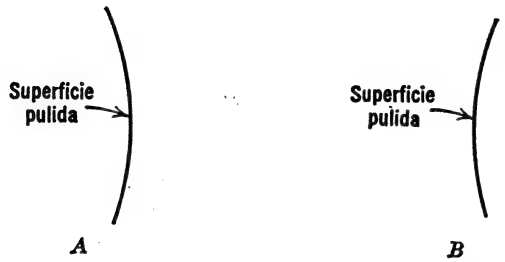
Sección 4. Espejos esféricos cóncavos

Las imágenes en los espejos planos son el más simple de los fenómenos de la reflexión. Las imágenes que se observan en los espejos curvos, o las que éstos proyectan en una pantalla, constituyen un problema más complicado de la óptica geométrica.

En las secciones 4 y 5 de este capítulo consideraremos los espejos curvos más simples: los esféricos cóncavos y convexos. Estos son susceptibles de un tratamiento matemático sencillo y nos introducen a un terreno de la óptica que tiene múltiples aplicaciones, comenzando con los espejos de amplio campo de visión que se usan en las tiendas de autoservicio para descubrir hurtos, hasta los espejos gigantes que concentran la luz de las estrellas en los grandes telescopios.

56/reflexión de la luz

1. Si se pule la superficie *interior* de un casquete de una esfera hueca, la superficie reflectora toma el nombre de espejo esférico *cóncavo.*



A y *B* son secciones de espejos esféricos. El espejo esférico cóncavo es el (*A*/*B*).

* * * * *

A

2. Si pulimos la superficie *exterior* de un casquete de esfera hueca, la superficie reflectora toma el nombre de espejo esférico *convexo.*

A, B y *C* son superficies reflectoras; las flechas apuntan a las caras pulidas. ¿Cuál de ellas es un espejo esférico cóncavo?, ¿cuál es un espejo plano?, ¿cuál es un espejo esférico convexo?

* * * * *

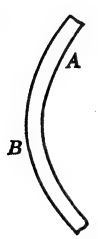
C; *A*; *B*

3. Si se pulen las superficies interior y exterior de un casquete de una esfera hueca, la superficie (interior/exterior) es un espejo esférico cóncavo, y la superficie (interior/exterior) es un espejo esférico convexo.

* * * * *

interior
exterior

4.

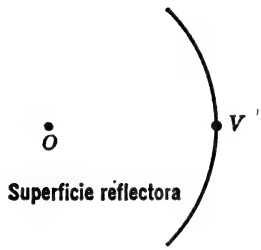


Esta es la sección de un casquete de una esfera hueca; si las superficies *A* y *B* están pulidas, *B* puede usarse como espejo esférico ..... y *A* como espejo esférico .....

* * * * *

convexo
cóncavo

5.

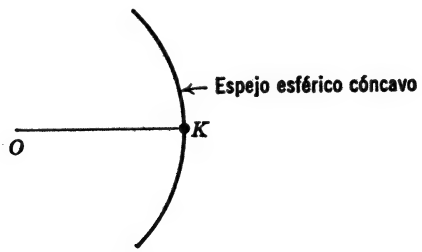


Se llama centro de curvatura de un espejo al centro de una esfera imaginaria de la que forma parte tal espejo, ya sea cóncavo o convexo. El centro del espejo se llama su vértice. En esta figura el punto *V* es el (centro de curvatura/vértice).

* * * * *

vértice.

6.

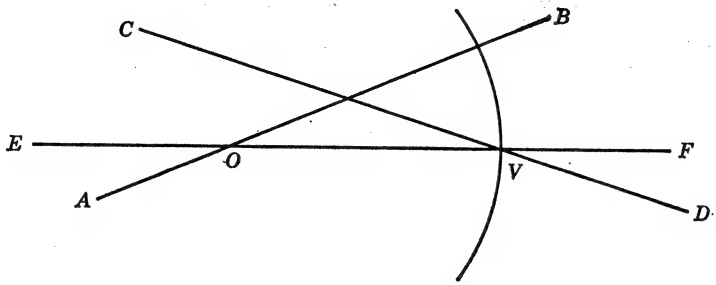


Se llama radio de curvatura de un espejo al radio de la esfera de la que forma parte tal espejo esférico, ya sea cóncavo o convexo. El punto *O* es el (radio/centro) de curvatura. La línea *OK* es el (radio/centro) de curvatura.

* * * * *

centro
radio

7.

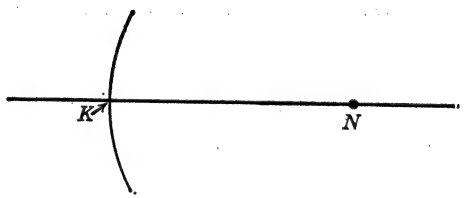


Se llama eje principal de un espejo esférico a la línea que pasa por el centro de curvatura y el vértice del espejo. El eje principal del espejo de arriba es $(AB/CD/EF)$; el centro de curvatura es $(A/O/V/F)$.

* * * * *

EF
O

8.



K es el ..... de este espejo esférico, y *N* es su ....

* * * * *

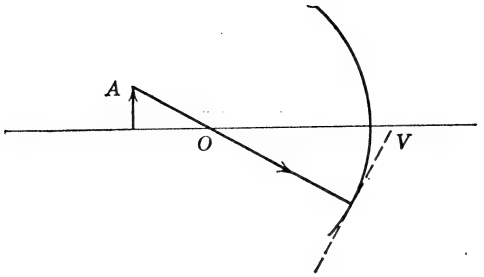
vértice
centro de curvatura

9. Refirámonos a la figura del marco anterior.
La línea que pasa por *K* y *N* se llama .... del espejo.
La longitud de *NK* da la medida del ..... de ..... de este espejo.

* * * * *

eje principal
radio (de) curvatura

10.



Un rayo de luz que parta de *A* y pase por el centro de curvatura de un espejo esférico cóncavo, incide en el espejo con un ángulo de ..... grados.

* * * * *

0 ó cero.

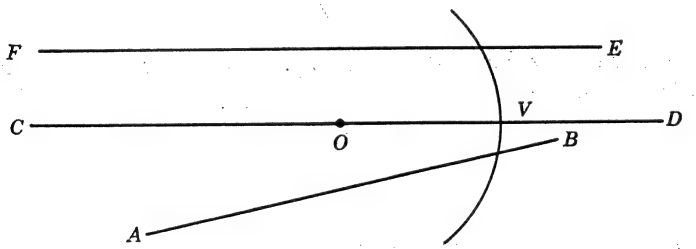
11. Vea la figura del marco anterior.

El rayo que parte de *A* se reflejará (a la derecha de *O*/a la izquierda de *O*/hacia atrás pasando por *O*).

* * * * *

hacia atrás pasando por *O*.

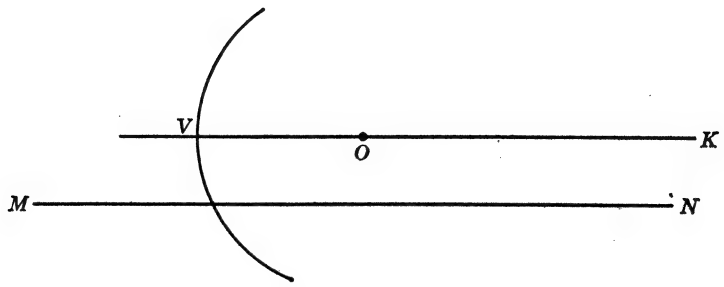
12.



Se llama eje secundario a cualquier línea paralela al eje principal de un espejo esférico. *CD* (es/no es) un eje secundario; *AB* (lo es/no lo es).

* * * * *

no es
no lo es

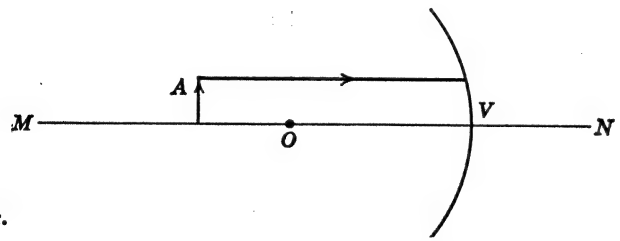


13.

KV es (el eje principal/un eje secundario). *MN* es (el eje principal/un eje secundario). La distancia de *O* a *V* se llama ..... de .... del espejo.

* * * * *

el eje principal
un eje secundario
radio (de) curvatura



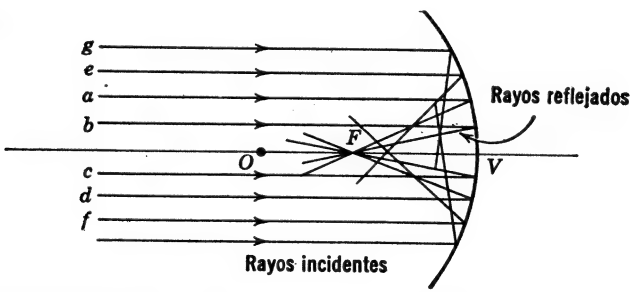
14.

El rayo que parte de *A* hacia el espejo es paralelo a *MN*; por lo tanto, va a lo largo de un eje ..... del espejo.

* * * * *

secundario

15.



Los rayos paralelos al eje principal y relativamente cercanos a él (*a*, *b*, *c*, *d*) se reflejan a través (de diferentes puntos/ del mismo punto).

* * * * *

del mismo punto

16. Refiérase a la figura del marco anterior.

Los rayos luminosos paralelos al eje principal pero relativamente lejos (*e*, *f*, *g*) de él (se/no se) reflejan a través del mismo punto, como lo hacen aquéllos que están relativamente cerca del eje principal.

* * * * *

no se

17. Refirámonos a la figura del marco 15.

Se llama *foco* al punto por el que pasan los rayos *a*, *b*, *c*, y *d* después de reflejarse. La distancia entre el foco y el vértice del espejo se llama *distancia focal* del mismo. La distancia focal de este espejo es (*OF*/*OV*/*FV*); su radio de curvatura es (*OF*/*OV*/*FV*).

* * * * *

FV; *OV*

18. Refirámonos a la figura del marco 15.

Los rayos *e*, *f* y *g* (pasan/no pasan) por el foco después de reflejarse en el espejo. *OV* es (la distancia focal/el radio de curvatura) del espejo. *FV* es (la distancia focal/el radio de curvatura).

* * * * *

no pasan
el radio de curvatura
la distancia focal

19. Las medidas experimentales indican que la distancia focal de un *espejo esférico cóncavo* es de un valor muy cercano al de la mitad de su radio de curvatura. En la figura del marco 15, si $OV = 10$ cm, $FV =$ .... cm.

* * * * *

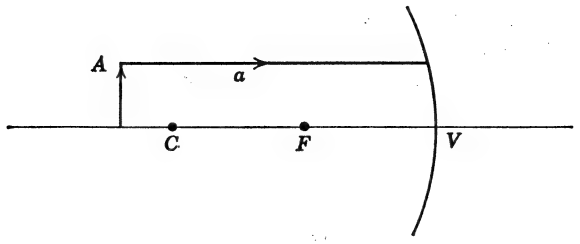
5

20. Los rayos paralelos al eje principal de un espejo esférico cóncavo y relativamente (cerca/lejos) del eje, pasan por el punto llamado ..... después de reflejarse en el espejo. La distancia entre este punto y el vértice del espejo es .... del radio de curvatura del espejo.

* * * * *

cerca
foco
la mitad.

21.

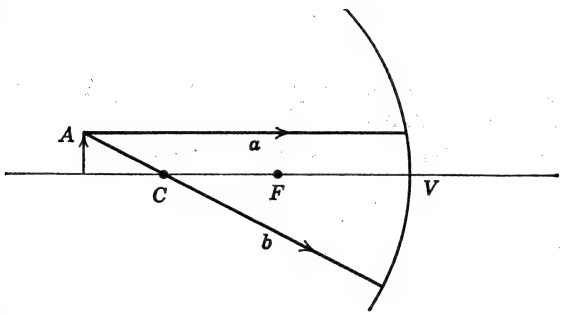


CV = radio de curvatura = 20 cm
FV = distancia focal del espejo

El rayo a que parte de A, paralelo al eje principal se refleja pasando por (C/F). La distancia focal del espejo es de ..... cm.

F; 10

22.

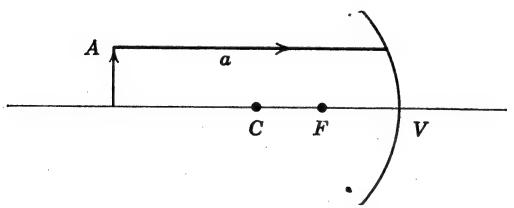


El rayo a se refleja en el espejo y pasa por (C/F). El rayo b pasa por (C/F) después de reflejarse en el espejo.

* * * * *

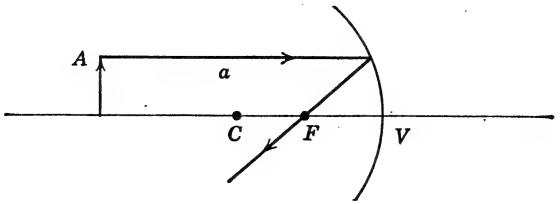
F; C

23.



a es un rayo de luz que parte de A. Si C es el centro de curvatura de este espejo esférico cóncavo y F su foco, trace el rayo reflejado por el espejo.

* * * * *



(el rayo reflejado que usted trazó debe pasar por el foco F).

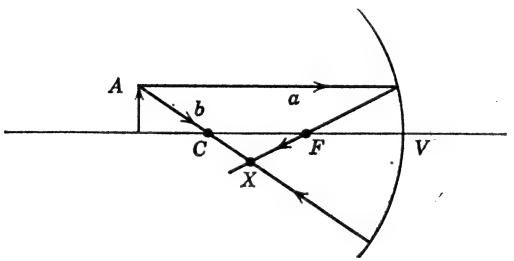
24. Refirámonos a la figura del marco anterior.

¿Cómo se reflejará un rayo que parta de A y pase por C?

* * * * *

se reflejará pasando por C.

25.

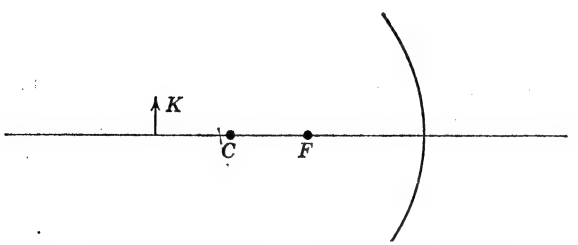


De A parten dos rayos, uno (a) a lo largo de un eje secundario, y el otro (b) pasando por el centro de curvatura; se reflejan en el espejo y se *intersectan* en el punto ($C/X/A/F$). Este punto es la *imagen* del punto ($C/X/A/F$).

* * * * *

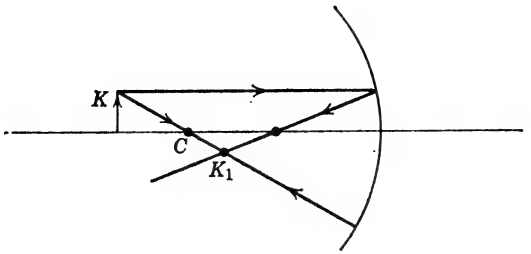
X; A.

26.

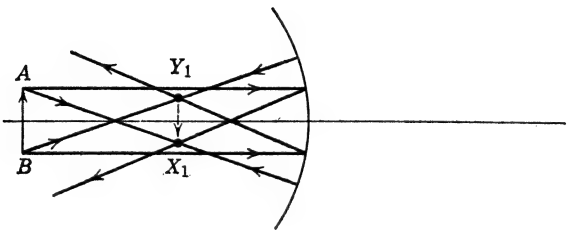


C es el centro de curvatura y F el foco. Usando el método descrito en el marco anterior construya la imagen de K y rotúlela K_1.

* * * * *



27.



Y_1 es la imagen de (A/B).
X_1 es la imagen de (A/B).
X_1Y_1 es la ..... de AB.
* * * * *
B; A
imagen

28. Refirámonos a la figura del marco anterior.
X_1Y_1 la forman los rayos de luz que refleja el espejo y que *realmente* se intersectan en el espacio; por esta razón se llama imagen *real.* La imagen en un espejo plano la forma la proyección de los rayos reflejados, detrás del espejo, donde sabemos que *no pueden* realmente juntarse, por ello se le llama imagen .....
* * * * *
virtual

29. Vea la figura del marco 27.
La imagen formada aquí es (más pequeña que el/más grande que el/del mismo tamaño del) objeto AB. (Si duda, mida las longitudes de AB y de X_1Y_1.)
* * * * *
más pequeña que el

30. Vea la figura del marco 27.
Idealmente, toda la luz que parte de AB y llega al espejo se refleja en él, lo que significa que esta luz al reflejarse y formar X_1Y_1, se con-

centra, en este caso particular, en un espacio (mayor/menor) en X_1Y_1 y por lo tanto la imagen es (más/menos) brillante que el objeto.
* * * * *
menor
más

31. Vea la figura del marco 27.

Observe que la imagen de *AB* está *invertida,* es decir, con el extremo superior hacia abajo. La imagen que aparece en un espejo plano tiene el extremo superior del objeto también arriba, por lo que se llama *erecta.* La imagen del marco 27 es (real/virtual), más (grande/pequeña) y (más/menos) brillante que su objeto, y es (erecta/invertida).
* * * * *
real
pequeña
más
invertida

32. Refirámonos al panel 2.

La letra que está en la esquina superior derecha es una ....
* * * * *
K

33. Panel 2.

En la Fig. 1 vemos que desde la izquierda llega la luz de un objeto muy lejano, como por ejemplo, el Sol. Todos los rayos de este objeto son paralelos al eje ..... y por lo tanto se reflejan pasando por el ..... del espejo.
* * * * *
principal
foco

34. Panel 2, Fig. 1.

Una forma de encontrar la distancia focal de un espejo cóncavo es usar el espejo para enfocar la luz del Sol. Explique por qué.
* * * * *
porque los rayos luminosos del Sol se enfocan en el foco.

35. La *distancia focal* de un espejo cóncavo es la distancia de su foco a su vértice. Sean, en este libro, f = distancia focal, p = distancia del objeto al vértice del espejo y q = distancia de la imagen al vértice del mismo. En el panel 2, Fig. 3, si AB es el objeto, p = (*KP/PV/FV/KV*) y f = (*KP/PV/FV/KV*) y q = (*KV/PV/KP/FV*).
* * * * *
KV; *FV*; *PV*.

36. Panel 2.

Examine las figuras 3, 2 y 1 en este orden. A medida que el objeto se aleja (en símbolos, cuando $p \rightarrow \infty$) su imagen es más (grande/pequeña/permanece del mismo tamaño) y se acerca al punto (*F*/*C*/*V*).

* * * * *

pequeña; *F*

37. Panel 2, Fig. 1.

En símbolos, cuando $p \rightarrow \infty$, $q \rightarrow$ .... *(use símbolos).*

En palabras, a medida que el objeto se coloca a mayor distancia del espejo, su imagen se acerca a un punto situado en el ..... del espejo.

* * * * *

f; foco

38. La luz del Sol se enfoca en un punto a 2 m del vértice de un espejo esférico cóncavo. Sea *f* la distancia focal y *R* el radio de curvatura.

$f =$ ..... metros

$R =$ ..... metros

* * * * *

2; 4

39. Panel 2.

Examine las figuras 2 a 4. A medida que el *objeto AB* se acerca al centro de curvatura, la *imagen* A_1B_1 se hace más (grande/pequeña) y se (acerca al/aleja del) centro de curvatura.

* * * * *

grande
acerca al

40. Panel 2, Figs. 2 a 4.

Usando los símbolos descritos en el marco 35,
cuando $p \rightarrow R$ (o sea $2f$),
$q \rightarrow$ .....

* * * * *

R, o bien $2f$

41. Panel 2.

En la Fig. 4, cuando $p = 2f = R$, la imagen A_1B_1 se localiza en el punto ..... En otras palabras, cuando $p = R$, $q =$ .... *(letra).*

* * * * *

C; *R* ó $2f$

42. Panel 2.

Examine las Figs. 2 a 4. En todos los casos la imagen que forma el espejo es (erecta/invertida) y (real/virtual).

* * * * *

invertida
real

43. Panel 2.

En la Fig. 5, *AB* está situado entre *C* y *F*. En otras palabras, p $(>/=/<)$ $2f$ y p $(>/=/<)$ f.

* * * * *

$<$; $>$

44. Panel 2, Fig. 5.

En este caso el objeto está situado entre el ..... y el ..... de .....

* * * * *

foco
centro (de) curvatura

45. Panel 2, Fig. 5.

Cuando $2f$ (o R) $> p > f$, q $(>/=/<)$ $2f$.

* * * * *

$>$

46. Panel 2, Fig. 5.

Cuando *AB* está entre f y $2f$, A_1B_1 es (real/virtual), (erecta/invertida) y es más (grande/pequeña) y (entre f y $2f$/más allá de $2f$).

* * * * *

real
invertida
más grande
más allá de $2f$.

47. Panel 2, Fig. 5.

Puesto que la luz de *AB* se extiende en un espacio mayor en la imagen A_1B_1, la imagen es (más/menos) brillante que el objeto.

* * * * *

menos.

48. Panel 2.

En la figura 6, *AB* está situado en el foco, o bien, $p =$ .... *(en símbolos)*.

* * * * *

f

49. Panel 2.

Para simplificar en la Fig. 6 se han trazado únicamente los rayos que parten de A. Observe que estos rayos son ....., y que si se prolongaran (se/no se) juntarían en algún punto.

* * * * *

paralelos
no se

50. Panel 2. Compare las figuras 2 a 5 con la Fig. 6.

Cuando $p > f$, un espejo esférico cóncavo (produce/no produce) imagen.

Cuando $p = f$ un espejo esférico cóncavo (produce/no produce) imagen. Explique.

* * * * *

produce
no produce (porque los rayos del objeto se reflejan paralelos y por lo tanto no convergen para formar imagen)

51. Panel 2. Vea la Fig. 7.

En este caso, p $(>/=/<)$ f. Los rayos reflejados provenientes de AB (convergen/no convergen) para formar una imagen *real.*

* * * * *

$<$
no convergen.

52. Panel 2, Fig. 7.

A una persona que mire el espejo le parecerá que los rayos de A, al reflejarse, vienen de un punto A_1 (frente al/detrás del) espejo.

* * * * *

detrás del

53. Panel 2, Fig. 7.

Cuando AB está situado entre el foco y el espejo la imagen que se forma es (real/virtual), (erecta/invertida) y más (grande/pequeña) que el objeto.

* * * * *

virtual
erecta
grande

54. Panel 2. Repase las Figs. 1 a 4.

A medida que el objeto se acerca al centro de curvatura, la imagen se hace más (grande/pequeña) y se acerca a (F/C).

* * * * *

grande; C

55. Panel 2.

Cuando $p = 2f$, $q = \ldots.$ y A_1B_1 es (más grande/más chica/del mismo tamaño) que AB y (real/virtual/erecta/invertida). *(Puede escoger más de una respuesta.)*

* * * * *

$2f$ ó R
del mismo tamaño
real, invertida.

56. Panel 2.

A medida que el objeto se mueve de C a F, A_1B_1 se hace más (grande/pequeña/brillante/obscura) y se (acerca al/aleja del) espejo.

* * * * *

grande, obscura
aleja del

57. Panel 2. Refiérase a la Fig. 6.

Describa la imagen que forma el objeto cuando se encuentra éste en el foco.

* * * * *

no hay imagen

58. Panel 2.

Cuando se coloca el objeto entre el foco y el espejo, la imagen es (real/virtual), (erecta/invertida), más (grande/pequeña) y está (frente al/detrás del) espejo.

* * * * *

virtual
erecta
grande
detrás del.

59. Panel 2, Fig. 1.

En un espejo esférico cóncavo, los rayos de luz paralelos al eje principal (convergen/divergen) después de reflejarse.

Examine la Fig. 8. Este es un espejo esférico (cóncavo/convexo). Los rayos de luz paralelos, por ejemplo a y b en la figura, (convergen/divergen) después de reflejarse.

* * * * *

convergen
convexo
divergen

60. Panel 2. Examine la Fig. 8.

La imagen que se forma en un espejo esférico convexo es (real/virtual), (erecta/invertida), más (grande/pequeña) que el objeto y está (frente al/detrás del) espejo.

* * * * *

virtual
erecta
pequeña
detrás del

61. Cuando la imagen que forma un espejo esférico cóncavo es más grande que el objeto, se usa como amplificador. Esto ocurre en las figuras .... y .... del panel 2.

* * * * *

5 (y) 7

62. Un espejo esférico cóncavo amplifica siempre que el objeto se coloque entre el centro de curvatura y el ..... o entre el ..... y el ..... del espejo.

* * * * *

foco
foco
vértice

63. Un espejo esférico cóncavo da una imagen mayor cuando:

(1) $p <$ ...., y $p >$ ...., o cuando:

(2) $p <$ .....

* * * * *

$2f$ ó R, f; f

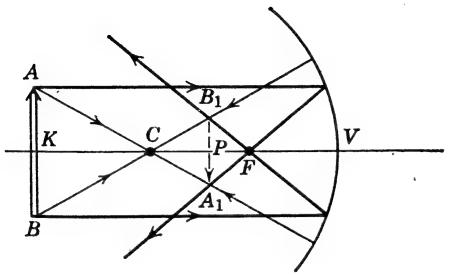
64. La imagen que forma un espejo esférico cóncavo es menos brillante que el objeto cuando se coloca entre .... *(complete).* En este caso, la imagen es más (grande/pequeña) que el objeto.

* * * * *

el foco y el centro de curvatura
grande

Sección 5. La fórmula del espejo: $\frac{1}{p}+\frac{1}{q}=\frac{1}{f}$

1.



A_1B_1 es la imagen de AB que forma este espejo.
f = distancia focal = ($KV/PV/CV/FV$).
p = distancia al objeto = ($KV/PV/CV/FV$).
q = distancia de .... = ($KV/PV/CV/FV$).

* * * * *

FV
KV
la imagen; *PV*

2. La distancia focal de un espejo esférico está en relación con las distancias a la imagen y al objeto en la ecuación: $\frac{1}{p}+\frac{1}{q}=\frac{1}{f}$; donde p es la distancia .... y q la distancia .. ..

* * * * *

al objeto
a la imagen

3. La distancia focal de un espejo esférico está en relación con su radio (R) de curvatura en la ecuación: R = ... La distancia focal se relaciona con las distancias a la imagen y al objeto en la ecuación: $\frac{1}{f}$ = ...

* * * * *

$2f$
$\frac{1}{p}+\frac{1}{q}$ *(esta ecuación debe memorizarse).*

4. Refirámonos al Panel 2, Fig. 2.
Suponga que el radio de curvatura de este espejo es de 20 cm y que

el objeto AB está situado a 40 cm del vértice. La distancia focal es $f =$ .... cm, y $p =$ .... cm.

* * * * *

10; 40.

5. Refiérase a los datos del marco anterior: $p = 40$ cm y $f = 10$ cm.

En la ecuación $\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q}$; la letra .. representa la distancia de la imagen al ..... del espejo. Despejando q, $q =$ ..... cm.

* * * * *

q

vértice

$$\frac{1}{10} = \frac{1}{40} + \frac{1}{q}$$

(multiplicando cada término por el mínimo común múltiplo $40q$, tenemos: $4q = q + 40$; $3q = 40$; $q = 13.3$ cm).

6. Panel 2, Fig. 2.

Suponga que $R = 20$ cm y que deseamos que la imagen se forme a 15 cm del espejo. ¿Dónde debe colocarse el objeto?

$f =$ ..... cm

$q =$ ..... cm

$p =$ ..... cm

* * * * *

$f = R/2 = 10$ cm; q es dato $(= 15$ cm)

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q}$$

$\frac{1}{10} = \frac{1}{p} + \frac{1}{15}$; multiplicando por $30p$, $3p = 30 + 2p$

$p = 30$ cm

7. Panel 2, Fig. 2.

Un objeto situado a 100 cm de un espejo esférico cóncavo produce una imagen real a 25 cm del espejo.

$p =$ ..... cm

$q =$ ..... cm

Con los datos, calcule la distancia focal y el radio de curvatura del espejo.

* * * * *

$p = 100$ cm

$q = 25$ cm

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q}$$

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{100} + \frac{1}{25}; \text{ multiplicando por } 100f,\ 100 = f + 4f$$

$$f = 20 \text{ cm}$$

$$R = 2f = 40 \text{ cm.}$$

8. Panel 2, Fig. 5.

El objeto *AB* se coloca a 15 cm de este espejo cuya distancia focal es de 10 cm. Calcule la distancia a la imagen.

* * * * *

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q}$$

$$\frac{1}{10} = \frac{1}{15} + \frac{1}{q}$$

$$3q = 2q + 30$$

$$q = 30 \text{ cm}$$

9. Se coloca un objeto a 20 cm del vértice de un espejo esférico cóncavo y proyecta una imagen sobre una pantalla que está a 100 cm de distancia. Calcule la distancia focal y el radio de curvatura del espejo.

* * * * *

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q}$$

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{20} + \frac{1}{100}$$

$$100 = 5f + f$$

$$6f = 100$$

$$f = 16\tfrac{2}{3} \text{ cm}$$

$$R = 2f = 33\tfrac{1}{3} \text{ cm}$$

10. Se sitúa un objeto a 5 cm del vértice de un espejo esférico cóncavo con una distancia focal de 10 cm. Calcule la distancia a la imagen.

* * * * *

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q}$$

$$\frac{1}{10} = \frac{1}{5} + \frac{1}{q}$$

$q = 2q + 10$

$q = -10$ cm (¡Piense!, ¿qué significa el signo menos?)

11. Refiriéndonos a los datos del marco anterior, ¿qué figura del panel 2 describe más este problema?

* * * * *

la figura 7. (El objeto está colocado entre el foco y el vértice.)

12. En la Fig. 7, el objeto está a un lado del espejo y la imagen en el lado opuesto. La imagen es (real/virtual).

* * * * *

virtual

13. El signo negativo indica que la imagen se forma en (el mismo lado/el lado opuesto) al espejo respecto al objeto.

* * * * *

el lado opuesto

14. Supondremos que la distancia al objeto siempre es positiva. Si la imagen está en el mismo lado del espejo en que se encuentra el objeto q será (positiva/negativa); si la imagen está en el otro lado del espejo q será (positiva/negativa).

* * * * *

positiva
negativa

15. Un objeto a 10 cm de un espejo esférico cóncavo produce una imagen que está a 15 cm al otro lado del espejo.

$p =$ ..... cm
$q =$ ..... cm
$f =$ ..... cm

* * * * *

$p = 10$

$q = -15$ *(no olvide el signo menos)*

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{10} + \frac{1}{-15} = \frac{1}{10} - \frac{1}{15}$$

$30 = 3f - 2f$

$f = 30$ cm

16. Panel 2. Refiérase a la Fig. 8.

Los rayos luminosos de A que llegan al espejo esférico *convexo*

(se intersectan/no se intersectan) después de su reflexión. La imagen de A aparece (frente al/detrás del) espejo.

* * * * *

no se intersectan
detrás del

17. La imagen que forma un espejo esférico convexo siempre es (real/virtual). Es (erecta/invertida) y más (grande/pequeña) que el objeto.

* * * * *

virtual
erecta
pequeña

18. Panel 2, Fig. 8.

Observe que la imagen y el foco de un espejo esférico convexo están en el lado del espejo opuesto al objeto. A este foco podemos llamarlo (real/virtual). En un espejo convexo tanto q como f son (positivos/negativos).

* * * * *

virtual
negativos

19. Panel 2, Fig. 8.

El radio de curvatura de este espejo convexo es de 10 cm. $f =$ ..... cm.

-5 *(No olvide el signo menos.)*

20. Panel 2, Fig. 8.

Use la distancia focal hallada en el marco 19. Si el objeto se coloca a 20 cm frente al espejo, la distancia a la imagen es $q =$ ..... cm.

* * * * *

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q}$$

$$-\frac{1}{5} = \frac{1}{20} + \frac{1}{q}$$

$$-4q = q + 20$$

$$-5q = 20$$

$$q = -4 \text{ cm}$$

21. ¿Qué significado tiene el signo menos de la respuesta al problema del marco anterior?

* * * * *

significa que la imagen está detrás del espejo y que es virtual.

22. ¿A qué distancia de un espejo esférico cóncavo debe colocarse un objeto para que produzca una imagen *virtual* que esté a 10 cm detrás del espejo? El radio de curvatura de éste es de 30 cm.

* * * * *

Si $R = 30$ cm, $f = 15$ cm y $q = -10$ cm

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q}$$

$$\frac{1}{15} = \frac{1}{p} + \frac{1}{-10}$$

$$\frac{1}{15} = \frac{1}{p} - \frac{1}{10}$$

$$2p = 30 - 3p$$

$$5p = 30$$

$$p = 6 \text{ cm}$$

23. Para un espejo esférico *cóncavo:*

p (siempre es positiva/siempre es negativa/a veces es positiva y a veces negativa).

q (siempre es positiva/siempre es negativa/ a veces es positiva y a veces negativa).

f (siempre es positiva/siempre es negativa/a veces es positiva y a veces negativa).

* * * * *

siempre es positiva
a veces es positiva y a veces negativa
siempre es positiva

24. Para un espejo esférico *convexo:*

p (siempre es positiva/siempre es negativa/a veces es positiva y a veces negativa).

q (siempre es positiva/siempre es negativa/a veces es positiva y a veces negativa).

f (siempre es positiva/siempre es negativa/a veces es positiva y a veces negativa).

* * * * *

siempre es positiva; siempre es negativa; siempre es negativa

25. La imagen que produce un espejo esférico convexo (siempre/nunca/ a veces) es virtual, (siempre/nunca/a veces) es invertida, (siempre/ nunca/ a veces) es más grande que el objeto.

* * * * *

siempre; nunca; nunca

26. El cociente $\frac{\text{tamaño de la imagen}}{\text{tamaño del objeto}}$ se llama *amplificación* (M) del espejo. También es cierto que $\frac{\text{tamaño de la imagen}}{\text{tamaño del objeto}} = \frac{q}{p}$. De esto se deduce que $M =$ ....., en función de p y q.

* * * * *

$\frac{q}{p}$

27. La imagen que proyecta un espejo esférico cóncavo de un objeto de 10 cm de alto es de 30 cm de alto. La amplificación que proporciona el espejo es ... *(número)*.

* * * * *

$$M = \frac{\text{tamaño de la imagen}}{\text{tamaño del objeto}} = \frac{30\text{ cm}}{10\text{ cm}} = 3.$$

28. Se coloca un objeto a 15 cm de un espejo cóncavo con una distancia focal de 5 cm. Calcule la distancia a la imagen y la amplificación.

* * * * *

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q}$$

$$\frac{1}{5} = \frac{1}{15} + \frac{1}{q}$$

$$3q = q + 15$$

$$2q = 15$$

$$q = 7.5$$

$M = \frac{q}{p} = \frac{7.5}{15} = 0.5$ (el tamaño de la imagen es la mitad del tamaño del objeto).

29. $\frac{\text{tamaño de la imagen}}{\text{tamaño del objeto}} =$ ..... en función de p y q.

* * * * *

$\frac{q}{p}$

30. Se coloca un objeto de 5 cm de alto a 15 cm de un espejo esférico cóncavo; su imagen se forma del mismo lado del espejo y a 45 cm de él.

Use la proporción deducida en el marco 29 para calcular la altura de la imagen.

* * * * *

$$\frac{\text{tamaño de la imagen}}{\text{tamaño del objeto}} = \frac{q}{p}$$

$$\frac{\text{tamaño de la imagen}}{5\text{ cm}} = \frac{45}{15} = 3$$

tamaño de la imagen = (3) (5 cm) = 15 cm de alto

31. Se coloca un objeto de 12 cm de alto a 15 cm de un espejo cóncavo con una distancia focal de 10 cm. Calcule la distancia a la imagen y su tamaño.

* * * * *

$$\frac{1}{10} = \frac{1}{15} + \frac{1}{q}$$

$$3q = 2q + 30$$

$$q = 30\text{ cm}$$

$$\frac{\text{tamaño de la imagen}}{\text{tamaño del objeto}} = \frac{q}{p}$$

$$\frac{\text{tamaño de la imagen}}{12\text{ cm}} = \frac{30\text{ cm}}{15\text{ cm}} = 2$$

tamaño de la imagen = 24 cm

32. Consulte las figuras del panel 2.

Cuando se usa un espejo esférico cóncavo para amplificar un objeto éste se debe colocar:

(a) más allá del centro de curvatura
(b) entre el centro de curvatura y el foco
(c) entre el foco y el vértice
(d) en el centro de curvatura
(e) en el foco.

* * * * *

(b) (vea la Fig. 5) y *(c)* (vea la Fig. 7).

33. Cuando se coloca el objeto entre el centro de curvatura y el foco, la imagen es:

(a) real
(b) virtual

(c) erecta
(d) invertida

* * * * *

(a) y *(d)*

34. Cuando se coloca el objeto entre el vértice y el foco, la imagen es:
(a) real
(b) virtual
(c) erecta
(d) invertida

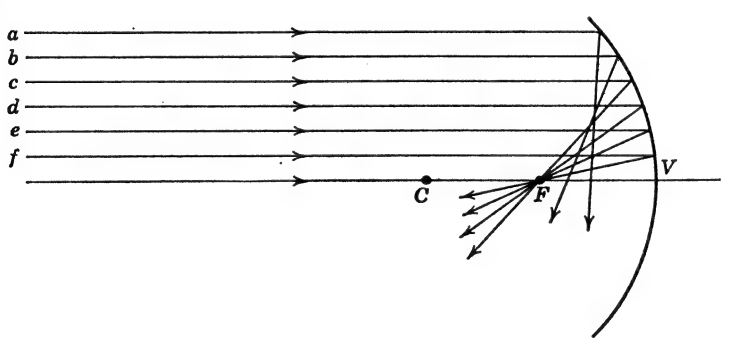
* * * * *

(b) y *(c)*

Sección 6. Aberración esférica; espejos parabólicos

La sencillez de la ecuación relacionada con nuestro estudio de los espejos esféricos hace suponer que los rayos de luz paralelos al eje principal se enfocan en un "punto" geométrico. A medida que aumenta el tamaño de la superficie reflectora, en relación al área de la superficie total de la esfera, el "punto" donde se encuentra el foco tiende a hacerse confuso y es cuando tenemos el defecto de los espejos esféricos, llamado *aberración esférica.* Consideraremos el remedio para este defecto: la superficie reflectora *parabólica.*

1.



Hemos visto que los rayos paralelos y relativamente cercanos al eje principal se reflejan a través (del mismo punto/de puntos diferentes).

* * * * *

del mismo punto

2. Refirámonos a la figura del marco anterior.
Los rayos paralelos al eje principal pero relativamente lejos de él (se/no se) reflejan a través del foco de un espejo cóncavo.
* * * * *
no se

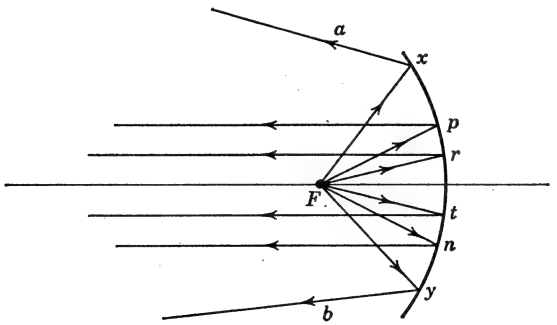
3. Esta ausencia de un foco único para *todos* los rayos paralelos al eje principal se llama aberración esférica porque es característica de los espejos ..... cóncavos.
* * * * *
esféricos

4. Los espejos esféricos cóncavos (reflejan/no reflejan) todos los rayos paralelos en el foco principal a través de un solo punto. Esto se llama ....
* * * * *
no reflejan
aberración esférica

5. Si se coloca una fuente puntual en el foco de un espejo esférico cóncavo los rayos luminosos que se reflejan en el espejo deben ser paralelos al .... del espejo.
* * * * *
eje principal

6. Sin embargo, esto es cierto solamente para los rayos relativamente (cercanos al/lejanos del) eje principal.
* * * * *
cercanos al

7.



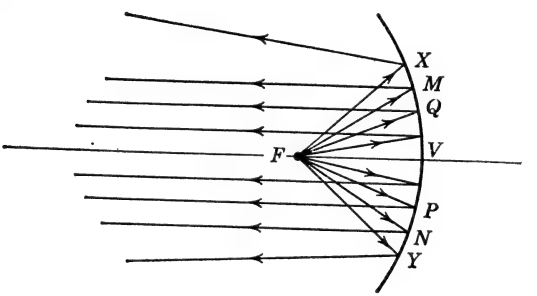
Se coloca una fuente luminosa en el foco de un espejo esférico cóncavo.

Los rayos *a* y *b* (son/no son) paralelos al eje principal. Esto se debe a la .... de esta clase de espejos.
* * * * *
no son
aberración esférica

8. Una forma de corregir la aberración esférica consiste en evitar que la luz se refleje en la parte del espejo donde ocurre ésta. En la figura del marco 7, a los puntos .... y .... no se les debería permitir que reflejasen la luz.
* * * * *
x (y) *y*

9. Se llama *abertura* a la superficie reflectora de un espejo esférico cóncavo. Para evitar la aberración esférica (agrandamos/disminuimos) la abertura del espejo.
* * * * *
disminuimos

10.



Para corregir la aberración esférica de este espejo podemos reducir su ..... de *XY* a *MN*.
* * * * *
abertura

11. El limitar la abertura es un dispositivo para eliminar la .... en un espejo esférico cóncavo.
* * * * *
aberración esférica

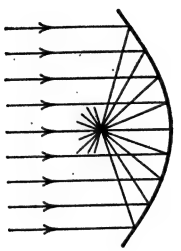
12. Al limitar la abertura (se/no se) reduce la cantidad de luz que refleja un espejo esférico.
* * * * *
se (porque al espejo se le permite que refleje menos luz del objeto)

13. Hay casos en los que se desea recibir y reflejar en el espejo la mayor cantidad posible de luz del objeto como, por ejemplo, en los telescopios reflectores donde los espejos curvos se usan para recoger la luz de estrellas distantes. En tales casos, el limitar la abertura (es/no es) un método útil de eliminar la aberración esférica. Explique.

* * * * *

no es (porque por su misma naturaleza evita que se refleje parte de la luz que llega a la superficie del espejo).

14.



Esta es una sección de un reflector *parabólico* (espejo parabólico cóncavo). Examine la forma en que enfoca los rayos paralelos.

El reflector parabólico (muestra/no muestra) aberración esférica. Explique su respuesta.

* * * * *

no muestra (puesto que *todos* los rayos paralelos a su eje principal se reflejan pasando por el mismo punto).

15. Cuando se requiere que un reflector recoja tanta luz como sea posible y tenga un enfoque claro, ¿qué es mejor usar, *(a)* un espejo esférico cóncavo, o *(b)* un reflector parabólico?

* * * * *

(b)

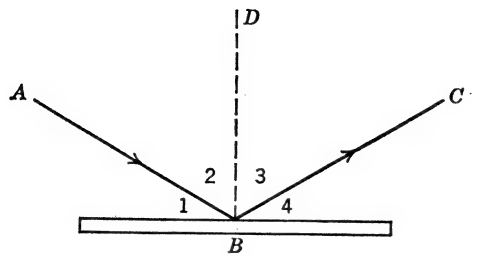
16. El reflector parabólico (siempre/a veces/nunca) requiere que se limite su abertura para corregir la aberración esférica.

* * * * *

nunca

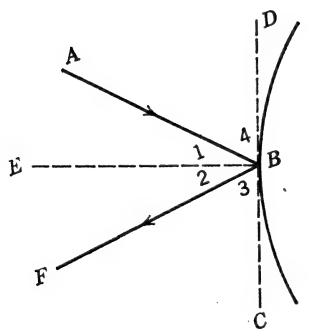
Sección 7. Repaso y problemas

1.



En esta figura, la normal es la línea (*AB*/*DB*/*CB*).
El ángulo de incidencia es el (1/2/3/4).
El ángulo de reflexión es el (1/2/3/4).
* * * * *
DB; 2; 3

2.



En esta figura, la línea *EB* es la ....., que es ..... a una ..... que toca a la curva en el punto de incidencia.
* * * * *
normal
perpendicular
tangente

3. Refiérase a la figura del marco anterior.
El ángulo de incidencia es el (1/2/3/4).
El ángulo de reflexión es el (1/2/3/4).
* * * * *
1; 2

4. La luz que vemos reflejada en una superficie sin pulir es un ejemplo de reflexión (regular/difusa).

* * * * *

difusa

5. Cuando usted está frente a un espejo plano y levanta su mano izquierda, su imagen en el espejo levanta su mano ..... Decimos que la imagen en un espejo plano está ....mente.

* * * * *

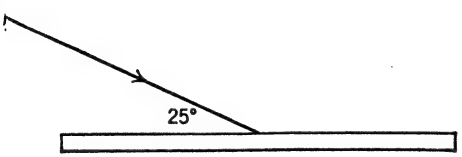
derecha
invertida lateral(mente)

6. Usted coloca un objeto frente a un espejo plano a 2 m; su imagen en el espejo está a .... metros de distancia del objeto. *(Piense en su respuesta.)*

* * * * *

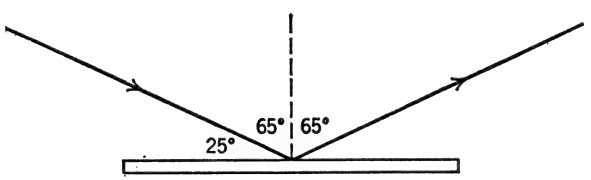
4

7.



¿Cuál es el ángulo de reflexión? *(Piense en su respuesta. Un dibujo puede serle útil.)*

* * * * *



65° (Recuerde que el ángulo de reflexión es el que hay entre la normal y el rayo reflejado.)

8. La imagen que forma un espejo plano es (real/virtual). Explique su respuesta.

* * * * *

virtual *(no* está formada por rayos que realmente se intersecten).

9. La imagen que forma un espejo esférico cóncavo (siempre es real/siempre es virtual/puede ser real o virtual). *(Si es necesario, refiérase al panel 2.)*

* * * * *

puede ser real o virtual

10. La imagen que forma un espejo esférico convexo (siempre es real/siempre es virtual/puede ser real o virtual).

* * * * *

siempre es virtual

11. Relacione las imágenes descritas en *(a)* a *(f)* con los objetos descritos de (1) a (6). Suponga que se trata de un espejo esférico cóncavo. *(Si fuere necesario, refiérase al panel 2.)*

(1) $p \rightarrow \infty$	*(a)* No se forma imagen.
(2) $p > R$	*(b)* Imagen erecta y virtual.
(3) $p = R$	*(c)* Imagen entre F y C, real e invertida.
(4) $p < R$ y $p > f$	*(d)* La imagen es un punto en F.
(5) $p = f$	*(e)* La imagen está en C real e invertida.
(6) $p < f$	*(f)* La imagen es real invertida y amplificada, $q > R$.

* * * * *

(1) *d*; (2) *c*; (3) *e*; (4) *f*; (5) *a*; (6) *b*

12. La imagen que se forma en un espejo esférico convexo es:

1. real
2. virtual
3. mayor
4. erecta
5. menor
6. invertida.

(Escoja más de una característica.)

* * * * *

virtual, erecta, menor

13. ¿Qué ventaja ofrece el reflector parabólico sobre el esférico cóncavo?

* * * * *

no tiene aberración esférica

14. Se coloca un objeto de 5 cm de alto a 100 cm de un espejo esférico cóncavo que tiene un radio de curvatura de 20 cm.

(1) ¿Cuál es la distancia focal del espejo?

(2) ¿A qué distancia del espejo se forma la imagen?

(3) ¿Qué altura tiene la imagen?
(4) La imagen es (real/erecta/mayor/menor/más brillante/menos brillante/invertida/virtual). *(Escoja cualesquiera características que se apliquen.)*

* * * * *

(1) $f = \frac{R}{2} = \frac{20\text{ cm}}{2} = 10\text{ cm}$

(2) $\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q}$

$\frac{1}{10} = \frac{1}{100} + \frac{1}{q}$

$10q = q + 100$

$9q = 100;\ q = \frac{100}{9} = 11.1\text{ cm}$

(3) $\frac{\text{tamaño de la imagen}}{5\text{ cm}} = \frac{100/9}{100} = \frac{100}{900} = \frac{1}{9}$

$\text{tamaño de la imagen} = \frac{5}{9}\text{ cm}$

(4) real, invertida, menor, más brillante

15. Se coloca un objeto a 5 cm de un espejo esférico cóncavo cuya distancia focal es de 10 cm.

(1) ¿Cuál es la situación exacta de la imagen?
(2) Describa la imagen.

* * * * *

(1) $\frac{1}{10} = \frac{1}{5} + \frac{1}{q}$
(2) $q = 2q + 10$
(3) $q = -10\text{ cm}$ (la imagen está a 10 cm, al otro lado del espejo)
(4) La imagen es virtual, erecta y mayor

16. Se coloca un objeto a 10 cm de un espejo esférico *convexo* cuya distancia focal es de 5 cm.

$p =$ ..... cm
$f =$ ..... cm *(¡Piense!)*
$q =$ ..... cm
Describa la imagen.

* * * * *

$p = 10$ cm
$f = -5$ cm (el foco es virtual)

$$-\frac{1}{5} = \frac{1}{10} + \frac{1}{q}$$

$-2q = q + 10$
$-3q = 10$
$q = -3.3$ cm

La imagen está detrás del espejo; es virtual, erecta y menor.

PROBLEMAS:

1. Un espejo esférico cóncavo tiene un radio de curvatura de 40 cm. ¿Cuál es su distancia focal?

2. Si el radio de curvatura del espejo cóncavo de un telescopio astronómico es de 15 metros, ¿cuál es la distancia focal?

3. Un objeto se encuentra a más de 2.5 distancias focales de un espejo que tiene un radio de curvatura de 2 metros. ¿De qué tamaño es la imagen invertida que se forma a 1.5 distancias focales?

4. Trace un diagrama que indique lo que sucede a los rayos que parten de un objeto que está a menos de una distancia focal de un espejo cóncavo que tiene un radio de curvatura de 20 cm.

5. Si el radio de curvatura de un espejo cóncavo es de 30 cm y se coloca un objeto *AB* a 50 cm del vértice, ¿cuál es la distancia focal y la distancia al objeto?

6. Usted desea formar una imagen a 20 cm de un espejo cóncavo de 10 cm de distancia focal. ¿Dónde coloca usted el objeto?

7. Si se coloca un objeto a 90 cm de un espejo cóncavo y se obtiene una imagen real a 20 cm del espejo, ¿cuáles son la distancia focal y el radio de curvatura?

8. Si se coloca un objeto *AB* a 10 cm de un espejo cóncavo con una distancia focal de 20 cm, ¿dónde está situada la imagen virtual?

9. Se coloca un objeto a 40 cm del vértice de un espejo esférico cóncavo y produce una imagen a 200 cm de distancia. ¿Cuál es la distancia focal?

10. Si la distancia focal de un espejo es de 12 cm, ¿cuál es la distancia a la imagen de un objeto colocado a 6 cm del vértice del espejo?

11. Trace un diagrama de rayos de una fuente puntual de luz colocada a la distancia focal de un espejo esférico cóncavo.

12. Si un espejo convexo tiene una distancia focal de 10 cm y un objeto está a 100 cm de distancia, ¿cuál es la distancia de la imagen virtual?

13. Un objeto a 15 cm de un espejo esférico produce una imagen que está a 20 cm del otro lado del espejo. ¿Cuál es la distancia focal, cuál la distancia de la imagen y cuál la distancia al objeto?

14. Suponga que el radio de curvatura de un espejo es de 40 cm y que hay un objeto *AB* a 80 cm del vértice. ¿Cuál es la distancia focal y cuál la distancia a la imagen?

15. Un objeto que está a 90 cm de un espejo esférico cóncavo produce una imagen real a 22.5 cm del vértice. ¿Cuál es la distancia focal del espejo?

16. Cuando un objeto se coloca a 6 cm del vértice de un espejo cóncavo con una distancia focal de 12 cm, ¿cuál es la distancia a la imagen?

17. Un objeto que tiene .20 cm de alto arroja una imagen de 40 cm. ¿Cuál es la amplificación?

18. Un objeto está a 10 cm de un espejo cuya distancia focal es de 5 cm. ¿Cuál es la distancia a la imagen y cuál la amplificación?

19. Si se sitúa un objeto a 20 cm de un espejo convexo que tiene una distancia focal de 10 cm, ¿cuál es la distancia a la imagen?

CAPITULO 3

REFRACCION DE LA LUZ

OBJETIVOS:

Al terminar el estudio de este capítulo, el estudiante debe ser capaz de:

1. Distinguir entre la refracción y la reflexión; definir aquélla.
2. Identificar el rayo incidente, la normal, el rayo reflejado y el refractado.
3. Enunciar la ley de la refracción; aplicar la ecuación: $n = \dfrac{\operatorname{sen} i}{\operatorname{sen} r}$.
4. Definir el índice absoluto de refracción.
5. Usar la ecuación simétrica: $n_1 \operatorname{sen} \theta_1 = n_2 \operatorname{sen} \theta_2$.
6. Definir y calcular el ángulo límite; definir y describir las condiciones de la reflexión total interna.
7. Distinguir las lentes convergentes de las divergentes.
8. Usar la ecuación del fabricante de lentes para calcular la distancia focal de las lentes delgadas.
9. Describir las imágenes que forman las lentes delgadas, en función de la distancia focal y de la distancia del objeto a la lente.
10. Usar la ecuación de las lentes para calcular su distancia focal, la distancia al objeto y a la imagen en una lente delgada.
11. Describir la dispersión de la luz blanca mediante un prisma.
12. Distinguir entre luz monocromática y policromática.
13. Describir la aberración cromática y la forma de evitarla.

NOTA PRELIMINAR:

En el capítulo 2 vimos que los fenómenos de la reflexión son susceptibles de un análisis matemático sencillo si suponemos que la luz al partir de una fuente se propaga en forma análoga a los rayos geométricos que parten de un punto.

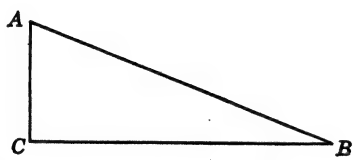
En este capítulo continuamos empleando la óptica geométrica en el examen de los fenómenos asociados con la refracción: la desviación que sufren los rayos luminosos al pasar de un medio transparente a otro.

Estos fenómenos son muchos y variados, desde el hecho de que un pez en una laguna parece estar más cerca de la superficie de lo que realmente está, hasta el empleo de lentes refringentes para corregir ciertos defectos de la visión, para proyectar imágenes en una pantalla, para examinar en detalle objetos muy distantes (con telescopios) y objetos muy pequeños (con microscopios).

Un tratamiento cuantitativo de la refracción implica el uso de la trigonometría elemental; en la sección 1 de este capítulo se suministra un repaso de ella. Cuantitativamente, la refracción es un tema más complicado que la reflexión porque trata del comportamiento de los rayos luminosos en distintos medios. Aún así, es asombroso ver cuántos fenómenos de la refracción quedan explicados aplicando unas cuantas relaciones matemáticas sencillas.

Sección 1. Repaso de trigonometría

1.

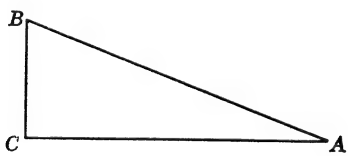


Este es un triángulo rectángulo. El ángulo C es (recto/obtuso/agudo). El ángulo A es (recto/obtuso/agudo).

* * * * *

recto
agudo

2.



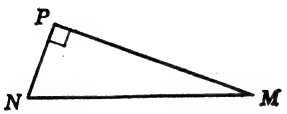
ABC es un $\triangle$ rectángulo. Identificamos sus ángulos con las letras mayúsculas que indican los vértices del triángulo y los lados opuestos a los ángulos con las mayúsculas de sus extremos. Los ángulos agudos de este $\triangle$ rectángulo son: $\angle$..... y $\angle$..... El lado opuesto al $\angle A$ es BC. El lado opuesto al $\angle C$ es ..... y se llama h.....

* * * * *

en cualquier orden: A, B

AB ó *BA*
hipotenusa.

3.

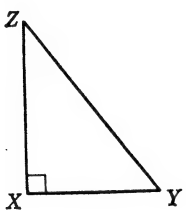


La hipotenusa de este △ rectángulo es ..... Los catetos de este triángulo rectángulo son ..... y .....

* * * * *

MN
en cualquier orden: NP, MP.

4.

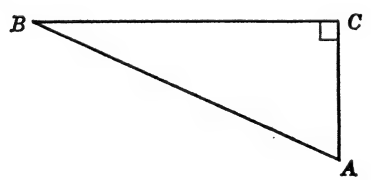


En cualquier triángulo: $\angle X + \angle Y + \angle Z = ...^\circ$.
En este △ rectángulo, $\angle Z + \angle Y = ...^\circ$.
Conforme al teorema de Pitágoras, $(ZY)^2 = ... + ...$ *(Use símbolos.)*

* * * * *

180
90
$(XZ)^2 + (XY)^2$

5.



Definimos las funciones trigonométricas de los ángulos agudos de un △ rectángulo mediante los siguientes cocientes: seno $= \dfrac{\text{cateto opuesto}}{\text{hipotenusa}}$.

En este caso, sen A = ... *(Use símbolos.)*

Coseno = $\frac{\text{cateto adyacente}}{\text{hipotenusa}}$. En la figura, cos A = ...

* * * * *

$\frac{BC}{AB}$

$\frac{AC}{AB}$

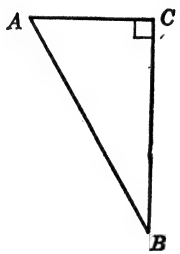
6. Refiérase a la figura del marco anterior.

Tangente = $\frac{\text{cateto opuesto}}{\text{cateto adyacente}}$. En la figura, tan A = ...

* * * * *

$\frac{BC}{AC}$

7.



Repase estas definiciones de las funciones trigonométricas y, en seguida, usando esta figura,

sen B = ...

cos B = ...

tan B = ...

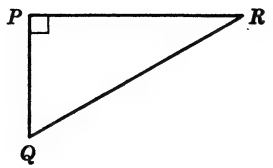
* * * * *

$\frac{AC}{AB}$

$\frac{BC}{AB}$

$\frac{AC}{BC}$

8.



tan R = ...
cos Q = ...
sen R = ...
sen Q = ...

* * * * *

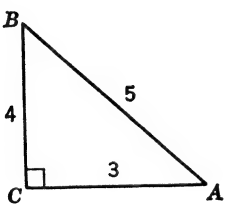
$\frac{PQ}{PR}$

$\frac{PQ}{QR}$

$\frac{PQ}{QR}$

$\frac{PR}{QR}$

9.



Usando los valores dados aquí, calcule:

sen A = ...
cos B = ... } con 3 decimales
tan A = ...

* * * * *

sen A = 4/5 = .800
cos B = 4/5 = .800
tan A = 4/3 = 1.333

10. Refirámonos al panel 3. Esta es una tabla de valores de funciones trigonométricas de ángulos agudos.

sen 26° = ...
cos 26° = ...
tan 26° = ...

* * * * *

.438; .899; .488

11. Panel 3.
sen A = .602
$\angle A$ = ...°.

* * * * *

37° (baje por la columna seno hasta encontrar .602; el ángulo correspondiente está a la izquierda, en la columna ángulo).

12. Panel 3.
cos X = .995
$\angle X$ = ...°.

* * * * *

6°

13. tan θ = 2.246
$\angle\theta$ = ...°.

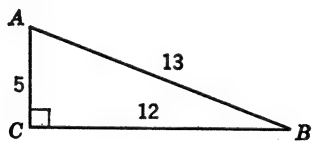
* * * * *

66°

14. Panel 3.
sen θ = .492
Encuentre el valor más aproximado del $\angle\theta$.

29° (.492 está en la columna del seno entre .485 y .500, quedando más cerca a .485, que es el seno de 29°).

15. Panel 3.



Calcule tan B con 3 decimales, y en seguida encuentre en las tablas el valor más aproximado de $\angle B$.

* * * * *

tan B = $\frac{5}{12}$ = .417
B = 23°

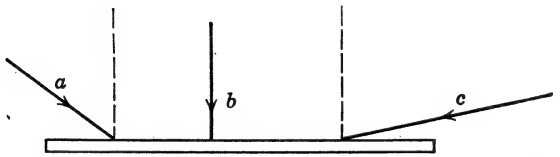
16. Usando la figura del marco anterior, calcule $\cos A$ y encuentre $\angle A$ en las tablas.

* * * * *

$\cos A = 5/13 = .384$
$\angle A = 67°$

Sección 2. Rayos refractados - Leyes de la refracción; $\frac{sen\ i}{sen\ r} = constante$

1.



Siempre que un rayo de luz llega a una superficie con un ángulo de incidencia diferente de 0°, se dice que incide *oblicuamente.* En la figura anterior, ¿qué rayo(s) incide(n) oblicuamente?

* * * * *

a, c

2. Refirámonos al panel 4.
La letra en la esquina superior derecha es una ...

* * * * *

M

3. Panel 4.
Lea el párrafo descriptivo de la Fig. *(a).* El rayo de luz procedente de la parte superior izquierda incide (normalmente/oblicuamente) en la superficie del agua

* * * * *

oblicuamente

4. Panel 4. Vea la Fig. *(a).*
(Toda la luz se refleja/parte de la luz se transmite a través del agua/ la luz no se refleja.)

* * * * *

parte de la luz se transmite a través del agua

5. Panel 4.

Cuando un rayo de luz que se propaga en un medio transparente entra en otro *oblicuamente* se desvía de su trayectoria rectilínea sin invertir su dirección de propagación. Esto se llama *refracción.* En la Fig. *(a),* los medios transparentes son el ..... y el .....

* * * * *

en cualquier orden: aire, agua

6. Panel 4, Fig. *(a).*

En esta figura, el rayo que no entra al agua pero que se eleva hacia la derecha de la superficie de ésta, es un ejemplo de (refracción/reflexión). La luz incidente que proviene de la parte superior izquierda toca a la superficie del agua (normalmente/oblicuamente). La parte de ella que se desvía hacia abajo a la derecha dentro del agua, es un ejemplo de (refracción/reflexión).

* * * * *

reflexión
oblicuamente
refracción

7. Panel 4, Fig. *(a).*

Cuando este haz de luz incide en la superficie del agua, parte de ella se ..... y parte se .....

* * * * *

en cualquier orden: refleja, refracta.

8. Panel 4, Fig. *(a).*

Si este haz de luz hubiera incidido en la superficie del agua normalmente, (se/no se) habría desviado al pasar la superficie (explique su respuesta).

* * * * *

no se (en este caso no habría entrado al agua oblicuamente).

9. Panel 4.

Para que haya refracción es necesario que un rayo de luz incida (normalmente/oblicuamente) en la superficie del segundo medio transparente. La Fig. *(b)* es una representación geométrica simplificada de la Fig. *(a).* Si el rayo debe refractarse, el ángulo θ_1 debe ser (mayor que/igual a) cero grados.

* * * * *

oblicuamente
mayor que

10. Recuerde que el ángulo de incidencia es el que hay entre el rayo ..... y .. .. En la misma forma definimos el ángulo de refracción, como el que hay entre el rayo ..... y .. ..

* * * * *

incidente
la normal
refractado
la normal

11. Panel 4. Vea la Fig. *(b)*.

Identifique como rayo (incidente/reflejado/refractado) a cada uno de los siguientes: *(a) BD, (b) AB, (c) BC.*

Identifique como ángulo de (incidencia/reflexión/refracción) a cada uno de los siguientes: *(d)* θ_3, *(e)* θ_1, *(f)* θ_2.

* * * * *

(a) refractado
(b) incidente
(c) reflejado
(d) reflexión
(e) incidencia
(f) refracción

12. Panel 4, Fig. *(b)*.

En el capítulo anterior vimos que θ_1 .. θ_3.

* * * * *

=

13. Panel 4, Fig. *(b)*.

En la figura, ¿son iguales el ángulo de refracción y el de incidencia? (Sí/No).

* * * * *

No

14. Ahora estableceremos una relación entre los ángulos θ_1 y θ_2. Refiérase a la Fig. *(c)* del Panel 4. (En esta figura se han eliminado los rayos reflejados para simplificar el diagrama.) Los rayos luminosos de una misma fuente *S* inciden en la superficie del vidrio con (el mismo ángulo/diferentes ángulos) de incidencia.

* * * * *

diferentes ángulos

15. Panel 4. Vea la Fig. *(d)*.

Esta es una tabla de ángulos de incidencia con sus ángulos de re-

fracción correspondientes. Un rayo de luz que incide con un ángulo de 30° se refracta con un ángulo de .... grados.

* * * * *

20

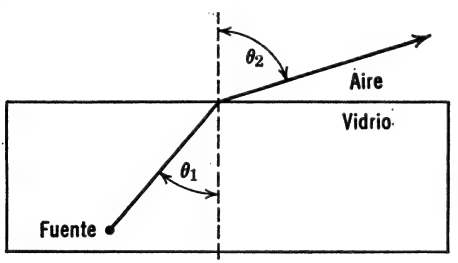
16. Panel 4, Fig. *(c)*.

Cuando un rayo de luz que se propaga en el aire entra oblicuamente al vidrio, su ángulo de refracción es (mayor que/igual a/menor que) su ángulo de incidencia. En todos los casos el rayo refractado se desvía (acercándose a/alejándose de) la normal.

* * * * *

menor que
acercándose a

17.



En este caso, el rayo de luz va del ..... al ..... θ_2 (>/<) θ_1 y el rayo refractado se desvía (acercándose a/alejándose de) la normal.

* * * * *

vidrio
aire
>
alejándose de

18. Panel 4, Fig. *(d)*.

Se suministra la tercera columna de esta tabla para el valor del cociente $\frac{\theta_1}{\theta_2}$, es decir, el cociente del ángulo de ..... entre el ángulo de ..... Calcule este cociente con dos decimales para el primer renglón.

* * * * *

incidencia
refracción

Para el primer renglón, $\frac{\theta_1}{\theta_2} = \frac{10}{6.7} = 1.49$

19. Panel 4, Fig. *(d)*.

Calcule el resto de los cocientes $\frac{\theta_1}{\theta_2}$ y llene la tercera columna de la tabla.

* * * * *

La figura *(d)* debe quedar así:

I	II	III
θ_1	θ_2	$\frac{\theta_1}{\theta_2}$
10	6.7	1.49
20	13	1.54
30	20	1.50
40	25	1.60
50	31	1.61
60	35	1.71
70	39	1.79

20. Panel 4, Fig. *(d)*.

Compare el cociente $\frac{\theta_1}{\theta_2}$ para ángulos de incidencia pequeños (10° a 30°) con el $\frac{\theta_1}{\theta_2}$ de ángulos de incidencia mayores (50° a 70°). Para ángulos de incidencia pequeños es casi una constante (la diferencia máxima es de .05 entre 10° y 20°). ¿Diría usted que esto es (más/menos) cierto para ángulos mayores? *(Compare* 58° *a* 70°.)

* * * * *

menos (entre 50° y 70° la diferencia es de 0.18, que es más del triple).

21. Panel 4, Fig. *(d)*.

En la cuarta columna de esta tabla se anotará el cociente .....

* * * * *

$\frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2}$

22. Panel 4, Fig. *(d)*.

En el primer renglón $\theta_1 =$ ....° y $\theta_2 =$ .....°. Usando la tabla del panel 3, sen $\theta_1 =$ ..... y sen $\theta_2 =$ .....

$\frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} =$ ..... *(con 2 decimales).*

* * * * *

10

6.7

.174

$$.117 \begin{cases} \text{sen } 7^\circ = .1219 \\ \text{sen } 6.7^\circ = .1166 \\ \text{sen } 6^\circ = .1042 \end{cases}$$

$$\frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = \frac{.174}{.117} = 1.50$$

23. Ponga este valor de $\frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2}$ en el primer renglón de la cuarta columna de la Fig. *(d)*. Ahora calcule el valor de $\frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2}$ para el resto de la cuarta columna.

* * * * *

$\theta_1 = 20^\circ \quad \theta_2 = 13^\circ \quad \frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = .342/.225 = 1.52$

$\theta_1 = 30^\circ \quad \theta_2 = 20^\circ \quad \frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = .500/.342 = 1.46$

$\theta_1 = 40^\circ \quad \theta_2 = 25^\circ \quad \frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = .643/.423 = 1.52$

$\theta_1 = 50^\circ \quad \theta_2 = 31^\circ \quad \frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = .766/.515 = 1.49$

$\theta_1 = 60^\circ \quad \theta_2 = 35^\circ \quad \frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = .866/.574 = 1.51$

$\theta_1 = 70^\circ \quad \theta_2 = 39^\circ \quad \frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = .940/.629 = 1.49$

24. Panel 4.

Anote los valores correctos para la cuarta columna en la Fig. *(d)*. Observe que si redondeáramos cada uno de los valores a la decimal más cercana, todos serían igual a ..... *(número)*.

* * * * *

1.5

25. Panel 4, Fig. *(d)*.

Suponiendo que los errores experimentales explicaran diferencias de aproximadamente .05, ¿qué cociente $\left(\frac{\theta_1}{\theta_2}\right.$ ó $\left.\frac{\operatorname{sen}\theta_1}{\operatorname{sen}\theta_2}\right)$ es más probable que sea una constante para todos los ángulos de incidencia?

* * * * *

$\frac{\operatorname{sen}\theta_1}{\operatorname{sen}\theta_2}$

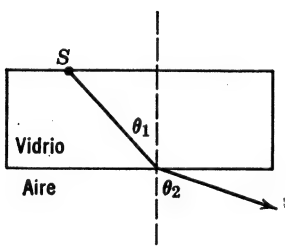
26. Panel 4, Figs. *(c)* y *(d)*.

El valor del cociente $\frac{\operatorname{sen}\theta_1}{\operatorname{sen}\theta_2}$ está en función de los medios transparentes presentes. En la Fig. *(c)* los medios transparentes son aire y .... El valor de este cociente se llama *índice de refracción relativo*. En este caso $\frac{\operatorname{sen}\theta_1}{\operatorname{sen}\theta_2}$ es el ..... de refracción del ..... respecto al aire.

* * * * *

vidrio
índice
vidrio.

27.

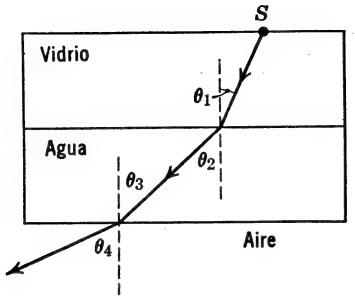


En la figura anterior, $\frac{\operatorname{sen}\theta_1}{\operatorname{sen}\theta_2}$ es el índice de ..... del aire .... al .....

* * * * *

refracción
respecto
vidrio

28.



$\frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2}$ es el ..... de ..... del ..... respecto al .....

* * * * *

índice (de) refracción
agua
vidrio

29. Refiérase a la figura del marco anterior. $\frac{\text{sen } \theta_3}{\text{sen } \theta_4}$ es una medida del ..... *(complete).*

* * * * *

índice de refracción del aire respecto al agua.

30. Cuando un rayo de luz que se propaga en un medio transparente entra oblicuamente en otro medio transparente se desvía de su trayectoria rectilínea. Este fenómeno se llama ..... y decimos que el rayo de luz se ..... al entrar al segundo medio.

* * * * *

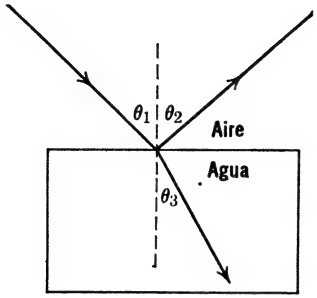
refracción
refracta

31. Siempre que un rayo de luz pasa oblicuamente de un medio transparente a otro, parte del rayo se ..... y parte se .....

* * * * *

en cualquier orden: refleja; refracta

32



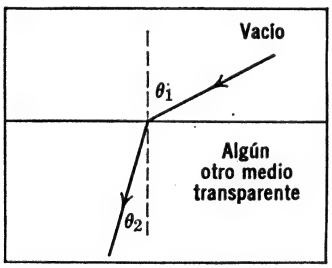
Sea n = índice de refracción del agua respecto al aire.
(1) Escriba una ecuación que relacione a θ_1 con θ_2.
(2) Escriba una ecuación que relacione entre sí a θ_1, θ_3 y n.
* * * * *
(1) $\theta_1 = \theta_2$

(2) $\dfrac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_3} = n.$

Sección 3. Indice absoluto de refracción.

$$n_x = \frac{V_{\text{aire}}}{V_x} \qquad n_1 \text{ sen } \theta_1 = n_2 \text{ sen } \theta_2$$

1.



Hasta ahora hemos considerado índices de refracción *relativos*. Cuando la luz va del *vacío* a otro medio (vea la figura), $\dfrac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2}$ es el índice de refracción de ese medio respecto al .....
* * * * *
vacío

2. El índice de refracción de cualquier medio transparente respecto al vacío se llama índice de refracción *absoluto* de ese medio. En la Fig. *(b)* del panel 4, suponga que la luz proviene del vacío, y no del aire, y que $\theta_1 = 30°$ y $\theta_2 = 22°$. Calcule el índice de refracción absoluto del agua.

* * * * *

$$\frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = \frac{\text{sen } 30°}{\text{sen } 22°} = .500/.375 = 1.33$$

3. Refirámonos a la Fig. *(e)* del panel 4.

El índice absoluto del aire, a una presión de 1 atmósfera y a 20°C, es ..... El índice de refracción del vidrio "crown" respecto al vacío es .....

* * * * *

1.0003
1.52

4. Panel 4, Fig. *(e)*.

El índice de refracción absoluto del aire, comparado con los índices de la mayoría de los medios transparentes, es (grande/pequeño).

* * * * *

pequeño

5. Por esta razón podemos obtener medidas relativamente precisas del índice de refracción absoluto de materiales transparentes, usando rayos incidentes que se propaguen en el ..... en vez de en el vacío.

* * * * *

aire

6. Para las medidas y problemas de este texto podemos considerar como índice de refracción absoluto de un medio transparente el índice de refracción de este material respecto al aire. Un rayo de luz propagándose en el aire incide en una superficie transparente a 41° y se refracta con un ángulo de 30°. El índice de refracción absoluto de este medio es .....

* * * * *

$$\frac{\text{sen } 45°}{\text{sen } 30°} = .707/.500 = 1.41$$

7. Un rayo de luz propagándose en el aire incide sobre un cristal de cuarzo a un ángulo de 45°. Usando la Fig. *(e)* del panel 4 y la tabla de

senos del panel 3, calcule el ángulo de refracción hasta el grado más próximo.

* * * * *

$$\frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = 1.54$$

$$\frac{\text{sen } 45°}{\text{sen } \theta_2} = 1.54$$

$$\text{sen } \theta_2 = \frac{\text{sen } 45°}{1.54} = .707/1.54 = .459$$

$\theta_2 \approx 27°$

8. Un rayo de luz propagándose en el aire se refracta con un ángulo de 10° al incidir en la superficie de un diamante. Calcule el ángulo de incidencia con un grado de aproximación.

* * * * *

$$\frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = 2.42$$

$$\text{sen } \theta_1 = (2.42)(\text{sen } \theta_2) = (2.42)(\text{sen } 10°) = (2.42)(.174 = .421$$

$\theta_1 \approx 25°$

9. Ahora deseamos establecer una relación entre los ángulos de incidencia y de refracción y la rapidez de propagación de la luz en los medios transparentes presentes.

Refirámonos al panel 5. La letra en la esquina superior derecha es una ...

* * * * *

K

10. Panel 5.

En la Fig. 1 vemos un haz de rayos paralelos propagándose en el aire (solamente se ilustran los rayos externos *MX* y *NY*) que incide en una placa de vidrio y se refracta dentro del mismo. El ángulo de incidencia es .... *(símbolo)*; el ángulo de refracción es .... *(símbolo)*.

* * * * *

θ_1; θ_2

11. Panel 5, Fig. 1.

XB y *YA* son perpendiculares a *NY* y *XT* respectivamente; esto significa que $\triangle XBY$ y $\triangle XAY$ son triángulos (oblicuángulos/rectángulos).

* * * * *

rectángulos.

12. Panel 5, Fig. 1.

Sean V_{aire} = rapidez de propagación de la luz en el aire y V_{vidrio} = rapidez de propagación de la luz en el vidrio. Por construcción, a medida que la luz recorre en el vidrio la distancia XA, en el aire recorre la distancia .....

* * * * *

BY

13. Panel 5.

Si t es el tiempo que emplea la luz en viajar de B a Y:

$$t = \frac{BY}{V_{aire}} \text{ y } t = \frac{XA}{\ldots}$$

* * * * *

V_{vidrio}

14. Panel 5, Fig. 1.

Puesto que $t = \frac{BY}{V_{aire}}$ y $t = \frac{XA}{V_{vidrio}}$; $\frac{BY}{V_{aire}} (=/>/<) \frac{XA}{V_{vidrio}}$:

* * * * *

=

15. Panel 5, Fig. 1.

$$\frac{BY}{V_{aire}} = \frac{XA}{V_{vidrio}}$$

Multiplicando en cruz y dividiendo ambos miembros entre $V_{vidrio}XA$:

$$\frac{V_{aire}}{V_{vidrio}} = \ldots\ldots$$

* * * * *

$$\frac{BY}{XA}$$

16. Panel 5, Fig. 1.

(1) Hemos demostrado que $\frac{V_{aire}}{V_{vidrio}} = \frac{BY}{XA}$

(2) Por geometría plana podemos demostrar que:
$\theta_1 = \angle BXY$ del $\triangle BXY$, y que
$\theta_2 = \angle XYA$ del $\triangle XYA$.

(3) En $\triangle BXY$, seno $\angle BXY =$ ..... (cociente de lados), y en $\triangle XYA$, seno $\angle XYA =$ ..... (cociente de lados).

* * * * *

$\frac{BY}{XY}$; $\frac{XA}{XY}$

17. Panel 5.

(1) $\frac{V_{\text{aire}}}{V_{\text{vidrio}}} = \frac{BY}{XA}$

(2) $\theta_1 = \angle BXY$ y $\theta_2 = \angle XYA$

(3) $\operatorname{sen} \angle BXY = \frac{BY}{XY}$; $\operatorname{sen} \angle XYA = \frac{XA}{XY}$

(4) $\left.\begin{array}{l} \operatorname{sen} \theta_1 = \ldots\ldots \\ \operatorname{sen} \theta_2 = \ldots\ldots \end{array}\right\}$ en función de BY, XY y XA.

* * * * *

$\frac{BY}{XY}$; $\frac{XA}{XY}$

18. Panel 5, Fig. 1.

(1) $\frac{V_{\text{aire}}}{V_{\text{vidrio}}} = \frac{BY}{XA}$ (3) $\operatorname{sen} \theta_2 = \frac{XA}{XY}$

(2) $\operatorname{sen} \theta_1 = \frac{BY}{XY}$ (4) Divida (2) entre (3)

Entonces: $\frac{\operatorname{sen} \theta_1}{\operatorname{sen} \theta_2} = \ldots\ldots$

* * * * *

$$\frac{\operatorname{sen} \theta_1}{\operatorname{sen} \theta_2} = \frac{BY/XY}{XA/XY} = \frac{BY}{XY} \div \frac{XA}{XY} = \left(\frac{BY}{XY}\right)\left(\frac{XY}{XA}\right) = \frac{BY}{XA}$$

19. Panel 5, Fig. 1.

(1) $\frac{V_{\text{aire}}}{V_{\text{vidrio}}} = \frac{BY}{XA}$

(2) $\frac{\operatorname{sen} \theta_1}{\operatorname{sen} \theta_2} = \frac{BY}{XA}$

(3) Use (1) y (2) para formar una ecuación que relacione a la rapidez de propagación de la luz en el aire y en el vidrio con los ángulos de incidencia y de refracción.

* * * * *

$$\frac{V_{\text{aire}}}{V_{\text{vidrio}}} = \frac{\operatorname{sen}\theta_1}{\operatorname{sen}\theta_2}$$

20. Panel 5, Fig. 1.

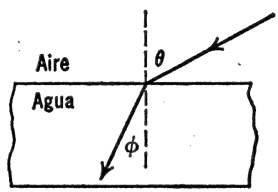
Hemos visto que $\dfrac{\operatorname{sen}\theta_1}{\operatorname{sen}\theta_2}$ es una medida del índice de refracción del vidrio. Recién hemos deducido otro cociente que se puede usar para medir lo mismo. Este es: ..... *(use símbolos).*

* * * * *

$$\frac{V_{\text{aire}}}{V_{\text{vidrio}}}$$

21. Sea n_{agua} = índice de refracción del agua.

n_{agua} = ..., o bien:
n_{agua} = ...



* * * * *

en cualquier orden: $\dfrac{\operatorname{sen}\theta}{\operatorname{sen}\phi}$ ó $\dfrac{V_{\text{aire}}}{V_{\text{agua}}}$

22. Dada una rapidez de propagación de la luz en el aire de 3×10^8 m/seg, calcule su rapidez en el agua *(use la tabla de la Fig. (e), panel 4).*

* * * * *

$$n_{\text{agua}} = \frac{V_{\text{aire}}}{V_{\text{agua}}}$$

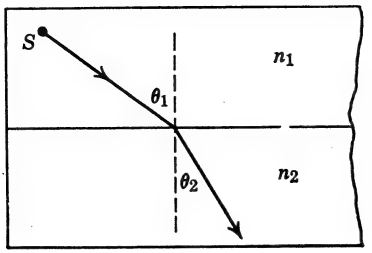
$$V_{\text{agua}} = \frac{V_{\text{aire}}}{n_{\text{agua}}} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/seg}}{1.33} = 2.25 \times 10^8 \text{ m/seg}$$

23. Calcule la rapidez de la luz en el vidrio "crown".

* * * * *

$$V_{\text{vidrio}} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/seg}}{1.52} = 1.97 \times 10^8 \text{ m/seg}$$

24.



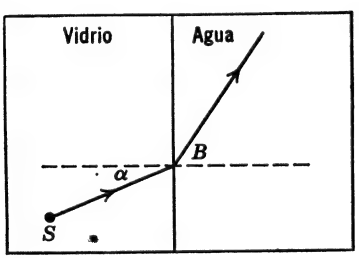
La relación que hemos estado considerando podemos generalizarla como sigue: Sean V_1 = rapidez de propagación de la luz en el medio con índice refringente n_1 y V_2 = rapidez de propagación de la luz en el medio con índice refringente n_2. Entonces

$\frac{V_1}{V_2}$ = ... en función de θ_1 y θ_2.

* * * * *

$\frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2}$

25.



$\frac{V_{\text{vidrio}}}{V_{\text{agua}}}$ = ... en función de α y B.

* * * * *

$\frac{\text{sen } \alpha}{\text{sen } B}$

26. Panel 5. Vea la Fig. 2.

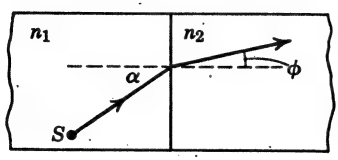
Empleando matemáticas más allá del alcance de este curso podemos expresar una ley general de la refracción como sigue: el producto del índice de refracción absoluto (n_1) del medio en que inicialmente se propaga un rayo, multiplicado por el seno del ángulo de incidencia, es igual al producto del índice de refracción absoluto (n_2) del medio refringente, multiplicado por el seno del ángulo de refracción.

Usando los símbolos empleados en el diagrama: ..... = ...

* * * * *

$n_1 \operatorname{sen} \theta_1 = n_2 \operatorname{sen} \theta_2$

27.

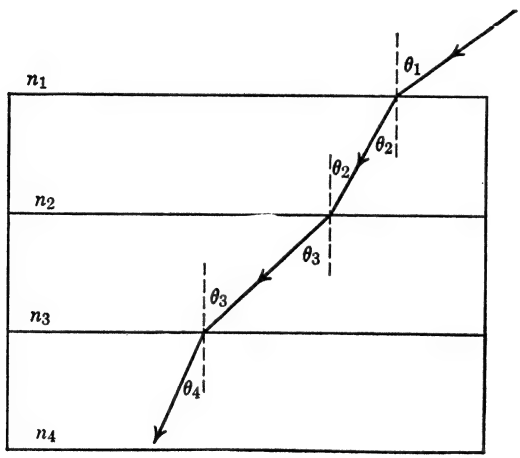


$n_1 \operatorname{sen} \alpha =$ .....

* * * * *

$n_2 \operatorname{sen} \phi$

28.



$n_1 \operatorname{sen} \theta_1 =$ .....

$n_2 \operatorname{sen} \theta_2 =$ .....

$n_3 \operatorname{sen} \theta_3 =$ .....

* * * * *

$n_2 \operatorname{sen} \theta_2$

$n_3 \operatorname{sen} \theta_3$

$n_4 \operatorname{sen} \theta_4$

29. Refiérase a la figura del marco anterior.

Forme una ecuación que relacione entre sí a n_1, n_4, θ_1 y θ_4.

* * * * *

$n_1 \operatorname{sen} \theta_1 = n_4 \operatorname{sen} \theta_4$

30. Un rayo de luz propagándose en el agua incide en una superficie de vidrio "crown" a un ángulo de 45°. Use n_{vidrio}, n_{agua}, θ_v y θ_a para relacionar las variables de este problema.

* * * * *

$n_{\text{agua}} \operatorname{sen} \theta_{\text{agua}} = n_{\text{vidrio}} \operatorname{sen} \theta_{\text{vidrio}}$

31. Use los datos del marco anterior y la tabla de la Fig. *(e)* del panel 4 para calcular el valor en grados enteros más aproximado del ángulo a que se refracta el rayo de luz en el vidrio.

* * * * *

$1.33 \operatorname{sen} 45° = 1.52 \operatorname{sen} \theta_{\text{vidrio}}$

$$\operatorname{sen} \theta_{\text{vidrio}} = \frac{(1.33)(.707)}{1.52} = .679$$

$\theta_{\text{vidrio}} \approx 38°$

32. Un rayo de luz que se propaga en el agua incide en la superficie de otro medio transparente a un ángulo de 30° y se refracta a un ángulo de 40°. Calcule el índice de refracción absoluto del segundo medio.

* * * * *

$n_1 \operatorname{sen} \theta_1 = n_2 \operatorname{sen} \theta_2$

$1.33 \operatorname{sen} 30° = n_2 \operatorname{sen} 40°$

$$n_2 = \frac{(1.33) \operatorname{sen} 30°}{\operatorname{sen} 40°} = \frac{(1.33)(.500)}{(.643)} = 1.03$$

33. En la ecuación general para los rayos refractados: $n_1 \operatorname{sen} \theta_1 = n_2 \operatorname{sen} \theta_2$; los símbolos n_1 y n_2 representan índices de refracción (absolutos/relativos).

* * * * *

absolutos

34. Un rayo de luz propagándose inicialmente en el vidrio "crown" incide en la superficie de otro medio a un ángulo de 50° y se refracta a uno de 42°. Calcule la rapidez de propagación de la luz en el segundo medio. *(Use* $V_{\text{aire}} = 3 \times 10^8$ m/seg.)

* * * * *

$(1.52) \operatorname{sen} 50° = n_2 \operatorname{sen} 42°$

$$n_2 = \frac{(1.52)(.766)}{(.669)} = 1.72$$

$$n_2 = \frac{V_{\text{aire}}}{V_2}$$

$$V_2 = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/seg}}{n_2} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/seg}}{1.72} = 1.75 \times 10^8 \text{ m/seg}$$

35. Supóngase que V_x es la rapidez de propagación de la luz en un medio de índice de refracción absoluto n_x. Entonces ..... =.... *(Use* V_{aire}, n_x y V_x.*)*

* * * * *

$$\frac{V_{\text{aire}}}{V_x} = n_x$$

36. Despejando V_x, V_x = ..., lo que indica que la rapidez de propagación de la luz en un medio transparente es (directamente/inversamente) proporcional al índice de refracción ..... de ese medio.

* * * * *

$$\frac{V_{\text{aire}}}{n_x}$$

inversamente
absoluto

37. A mayor índice de refracción absoluto de un medio transparente, (mayor/menor) rapidez de la luz en ese medio.

* * * * *

menor

38. A medida que el valor de un ángulo aumenta de 0° a 90° su seno (aumenta/disminuye/permanece constante). *(Compruébelo con su tabla de senos del panel 3.)*

* * * * *

aumenta

39. En la refracción: $n_1 \operatorname{sen} \theta_1 = n_2 \operatorname{sen} \theta_2$.

Despejando $\operatorname{sen} \theta_2$ obtenemos: $\operatorname{sen} \theta_2 = \frac{n_1}{n_2} \operatorname{sen} \theta_1$

Suponga $n_2 > n_1$; entonces θ_2 es (mayor que/menor que/igual a) θ_1 y el rayo se refracta (hacia/alejándose de) la normal.

* * * * *

menor que
hacia

40. $\text{sen } \theta_2 = \frac{n_1}{n_2} \text{sen } \theta_1$

Suponga $n_2 < n_1$; entonces el rayo de luz se refracta (acercándose a/alejándose de) la normal, porque .... *(Complete usando θ_1 y θ_2 en su explicación.)*

* * * * *

alejándose de (porque el ángulo de refracción θ_2 es, en estas circunstancias, mayor que el de incidencia θ_1).

41. Un rayo de luz que se propaga en el agua entra al aire con un ángulo oblicuo y se desvía (acercándose a/alejándose de) la normal. ¿Por qué?

* * * * *

alejándose de (porque $n_1 = n_{\text{agua}}$, que es mayor que $n_{\text{aire}} = n_2$. Puesto que $n_1 < n_2$, $\text{sen } \theta_2 > \text{sen } \theta_1$, es decir, el ángulo de refracción es mayor que el de incidencia).

42. En general, cuando un rayo de luz pasa oblicuamente de un medio de refracción a otro cuyo índice es menor que el del primero, el rayo se refracta (acercándose a/alejándose de) la normal. Cuando el rayo pasa oblicuamente de un medio a otro cuyo índice de refracción es mayor que el del primero, el rayo se refracta (acercándose a/alejándose de) la normal.

* * * * *

alejándose de
acercándose a

43. Refirámonos a la Fig. *(e)* del Panel 4.

Un rayo de luz que se propaga en el vidrio "flint" se refracta en el cristal de roca; esto significa que pasa de un medio con un índice refringente (mayor/menor) a otro con un índice refringente (mayor/menor); por lo tanto, se refracta (acercándose a/alejándose de) la normal.

* * * * *

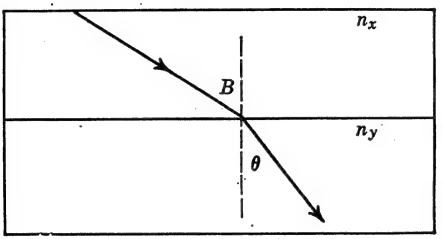
mayor
menor
alejándose de

44. La luz que pasa oblicuamente del vidrio "crown" al vidrio "flint" se refracta (acercándose a/alejándose de) la normal.

* * * * *

acercándose a

45.

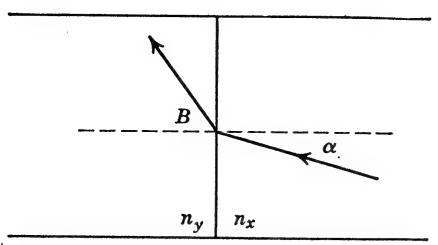


En la figura, el ángulo de incidencia es ... y el de refracción es .... ¿Qué ángulo es mayor, (θ/B)? ¿Qué es mayor, (n_y/n_x)? Explique.

* * * * *

B; θ; B; n_y (puesto que θ es menor que B, el rayo refractado se desvía acercándose a la normal; esto es lo que ocurre cuando el medio refringente es el de mayor índice de refracción).

46.



(1) Escriba una ecuación que relacione entre sí a α, B, n_x y n_y.

(2) ¿Qué es mayor, (n_y/n_x)? Explique su respuesta.

(3) Escriba una ecuación que relacione entre sí a: V_x, V_y, α, B. *(V_x y V_y representan la rapidez de propagación de la luz en estos medios.)*

* * * * *

(1) $n_x \operatorname{sen} \alpha = n_y \operatorname{sen} B$

(2) n_x es mayor porque el rayo se refracta alejándose de la normal, lo que significa que el medio refringente tiene un índice de refracción menor.

(3) $$\frac{V_x}{V_y} = \frac{\operatorname{sen} \alpha}{\operatorname{sen} B}$$

Sección 4. El ángulo límite y la reflexión total interna

$$\text{sen } \theta_c = \frac{n_2}{n_1}$$

Ahora hemos establecido una relación general entre los índices de refracción absolutos de dos substancias transparentes y los ángulos de incidencia y de refracción de los rayos que se propagan a través de ellas. También hemos establecido una relación entre la rapidez de propagación de la luz en los medios transparentes y sus índices de refracción.

En las secciones 4 a 6 consideraremos algunos fenómenos más complicados de la refracción: *el ángulo límite* y la *reflexión total interna,* y el hecho de que se pueden formar imágenes empleando las superficies refringentes de los dispositivos llamados *lentes.* Para complementar el estudio usted tendrá demostraciones en clase de estos fenómenos, y podrá producir en el laboratorio imágenes usando lentes sencillas.

En las secciones 5 y 6 observe la asombrosa semejanza entre las lentes convergentes y los espejos esféricos cóncavos, y entre las lentes divergentes y los espejos esféricos convexos. Observe también en el capítulo 2, sección 5, que la ecuación de las lentes y la del espejo son matemáticamente idénticas. No es de extrañar que el esmerilado de las lentes fuese una industria floreciente en el Siglo XVII y que la óptica geométrica aún sea un prototipo de una rama de la Física, reducida a un género de matemáticas aplicadas.

Pero, como veremos, no toda la óptica es geométrica.

1. Refiérase al panel 6.

La letra que está en la esquina superior derecha es una ....

* * * * *

A

2. Panel 6, Fig. 1.

Esta figura muestra una serie de rayos que parten de una fuente *S,* propagándose en un medio de índice refringente n_1 y entrando en otro de índice refringente n_2, (al mismo ángulo/a diferentes ángulos) de incidencia.

* * * * *

a diferentes ángulos.

3. Panel 6, Fig. 1.

A medida que los rayos de *S* entran al medio de índice refringente n_2, se refractan (hacia/alejándose de) la normal.

* * * * *

alejándose de

4. Panel 6, Fig. 1.
Puesto que el rayo refractado se desvía alejándose de la normal, el ángulo de refracción siempre es (mayor/menor) que el de incidencia, lo que significa que n_1 (>/<) n_2.
* * * * *
mayor; >

5. Panel 6, fig. 1.
En los puntos *A*, *B*, *C* y *D*, parte de la luz de *S* se ..... y parte se .....
* * * * *
en cualquier orden: refracta; refleja.

6. Panel 6, Fig. 1.
Examine los rayos refractados en *A*, *B*, *C* y *D*. A medida que el ángulo de incidencia aumenta, el de refracción (aumenta/disminuye), hasta que en *D*, el ángulo de refracción es de .... grados.
* * * * *
aumenta; 90

7. Panel 6, Fig. 1.
En el punto *D* de la figura hemos identificado el ángulo de incidencia como θ_c. A éste se le llama ángulo *límite,* porque es aquel ángulo particular de ..... para el cual el ángulo de ..... es de 90°.
* * * * *
incidencia
refracción

8. Panel 6, Fig. 1.
En *B* el ángulo de incidencia (es/no es) ángulo límite, porque su ángulo de refracción no es de .... grados.
* * * * *
no es; 90

9. Panel 6, Fig. 1.
En esta figura, el ángulo de incidencia en *D* se llama ángulo ..... porque es el ángulo particular de incidencia para el cual el ángulo de ..... es de 90°.
* * * * *
límite
refracción

10. Panel 6, Fig. 1.
El ángulo límite es uno de (incidencia/refracción/reflexión).
* * * * *
incidencia

11. ¿Todos los ángulos de incidencia son ángulos límite? (Sí/No). Explique.
* * * * *
No. Sólo aquellos ángulos de incidencia que tienen ángulo de refracción igual a 90° se llaman ángulos límite.

12. El ángulo límite existe sólo cuando $n_1 > n_2$, es decir cuando el ángulo de refracción es siempre (mayor/menor) que el de incidencia. Por lo tanto, el ángulo límite (puede/no puede) ser de 90°.
* * * * *
mayor
no puede

13. Panel 6, Fig. 1.
Examine la situación en *E*. Aquí el ángulo de incidencia es (mayor que el/igual al/menor que el) ángulo límite. Observe que (hay/no hay) rayo refractado. (Hay/no hay) rayo reflejado.
* * * * *
mayor que el
no hay
hay

14. Panel 6, Fig. 1.
En general, lo que ocurre en *E* siempre se verifica para cualquier ángulo de incidencia mayor que θ_c. En otras palabras, si el ángulo de incidencia excede al ángulo límite (se refleja parte de la luz/ se refleja toda la luz/se refracta toda la luz).
* * * * *
se refleja toda la luz

15. Panel 6, Fig. 1.
Este fenómeno se llama *reflexión total interna*. En *B* el ángulo de incidencia es (mayor/menor) que el ángulo límite. La reflexión total interna (ocurre/no ocurre) en *B*. En *E* el ángulo de incidencia es (mayor/menor) que el ángulo límite. La reflexión total interna (ocurre/no ocurre) en *E*.
* * * * *
menor; no ocurre;
mayor; ocurre.

16. Panel 6. Refirámonos a la Fig. 2.

La luz del proyector de la derecha entra al agua y se dirige hacia arriba hasta que toca la superficie, en la que se refleja (totalmente/parcialmente). Esto tiene lugar porque el ángulo de incidencia es (igual al/menor que el/mayor que el) ángulo límite, y porque el índice refringente absoluto del agua es (mayor que el/menor que el/igual al) del aire.

* * * * *

totalmente
mayor que el
mayor que el

17. El ángulo límite de incidencia ocurre solamente cuando el índice de refracción del medio incidente es (mayor que el/menor que el/igual al) del medio refractor. En tal situación, la reflexión .... de un rayo incidente ocurre únicamente cuando el ángulo de ..... es mayor que el ángulo .....

* * * * *

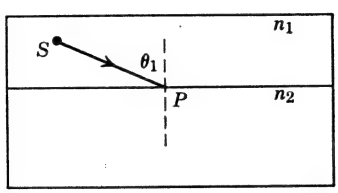
mayor que el
total interna
incidencia
límite.

18. El índice de refracción del aire es (mayor/menor) que el del agua. ¿Puede haber reflexión total interna cuando un rayo de luz pasa del aire al agua? (Sí/No). Explique.

* * * * *

menor
No (porque el índice de refracción del medio incidente (el aire) no es mayor que el del medio refractor).

19.



La reflexión total interna ocurre en P, si:

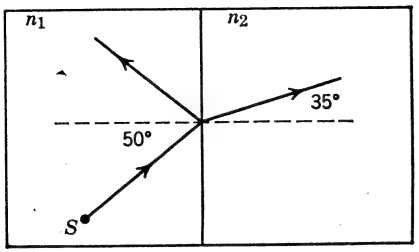
(1) n_2 (>/<) n_1, y

(2) θ_1 (>/=/<) θ_c.

* * * * *

<; >

20.



Examine esta figura. Compare el ángulo de incidencia con el de refracción. El rayo de luz de S (sufre/no sufre) reflexión total interna. Esto se debe a que $(n_1 > n_2/n_2 > n_1/\theta > \theta_c/\theta < \theta_c)$.

* * * * *

no sufre

$n_2 > n_1$ (porque el ángulo de refracción es menor que el de incidencia; entonces no puede haber ángulo límite y la reflexión total interna es imposible).

21. Necesitamos ahora encontrar una ecuación que nos permita calcular el ángulo límite, cuando exista. Disponemos de una ecuación general que relaciona los índices de refracción de dos medios (n_1 y n_2), con los ángulos de incidencia y de refracción (θ_1 y θ_2): .... *(escriba la ecuación).*

* * * * *

$n_1 \operatorname{sen} \theta_1 = n_2 \operatorname{sen} \theta_2$

22. Panel 6, Fig. 1.

En el punto D, $\theta_1 =$ .... *(use un símbolo de la figura)*, y $\theta_2 =$ ....° *(número)*. La ecuación general, aplicada al punto D en esta figura, se convierte en:

n_1 ..... $= n_2$ .....

* * * * *

θ_c; 90

$\operatorname{sen} \theta_c$; sen 90°

23. Panel 6, Fig. 1.

(1) $n_1 \operatorname{sen} \theta_c = n_2 \operatorname{sen} 90°$

(2) Refiriéndonos a la tabla del panel 3:
sen 90° = .. *(número)*.

(3) Despejando sen θ_c en (1) y substituyéndolo con el valor obtenido en (2), tenemos:
sen $\theta_c =$ .....

* * * * *

1

$\frac{n_2}{n_1}(1)$, o bien: $\frac{n_2}{n_1}$

24. Panel 6, Fig. 1.

Suponga que el agua es el medio donde la luz es incidente, y el medio refractor el aire *(use* $n = 1$*).*

$n_1 =$ ..... *(vea la Fig. (e) del panel 4).*

Calcule sen θ_c con 3 decimales.

* * * * *

1.33

$\text{sen } \theta_c = \frac{n_2}{n_1} = 1/1.33 = .752$

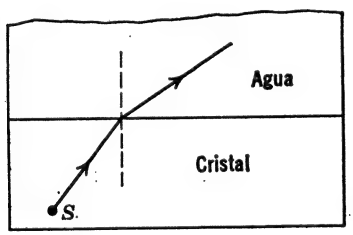
25. El ángulo límite para la luz que va del agua al aire es de aproximadamente ....°. Use los datos del marco anterior.

* * * * *

sen $\theta_c = .752$

$\theta_c = 49°$

26.



Suponga que la fuente luminosa está dentro del vidrio "flint" y que los rayos se refractan en el agua.

$n_1 =$ .....

$n_2 =$ .....

(use la Fig. (e) del panel 4).

¿A qué ángulo sufrirá reflexión total interna la luz de *S*?

* * * * *

1.66

1.33

sen $\theta_c = 1.33/1.66 = .805$

$\theta_c = 52°$

27. Calcule el ángulo límite para un rayo de luz que pasa del diamante al aire. (Use $n_2 = 1$.)

* * * * *

$\text{sen } \theta_c = \frac{n_2}{n_1} = 1/2.42 = .418$

$\theta_c = 24°$

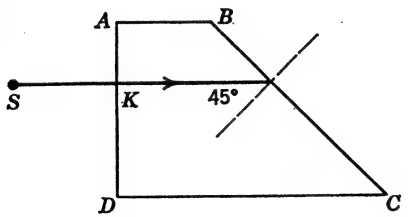
28. Calcule el ángulo límite de los rayos luminosos que pasan del vidrio "crown" al aire.

* * * * *

$\text{sen } \theta_c = \frac{n_2}{n_1} = 1/1.52 = .655$

$\theta_c = 41°$

29.



ABCD es un prisma de vidrio "crown". Un rayo de luz que proviene de *S* incide normalmente a *AD*; al entrar al vidrio en *K*, (se/no se) refracta; cuando llega al lado *BC* se (refracta/refleja totalmente). Explique.

* * * * *

no se (porque entra normalmente, no oblicuamente).
refleja totalmente, porque el ángulo de incidencia (45°) es mayor que el ángulo límite del vidrio respecto al aire (41°).

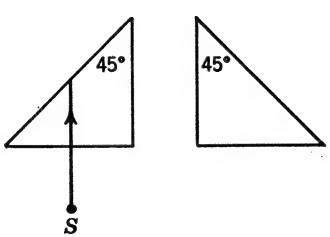
30. Refiérase a la Fig. 3 del panel 6.

XYZ es un prisma de vidrio "crown". Un rayo de luz que proviene de un objeto iluminado *AB* entra al prisma normalmente a *XY* y llega a *YZ* a ....°. Esto significa que el rayo de *A* se refleja (parcialmente/totalmente).

* * * * *

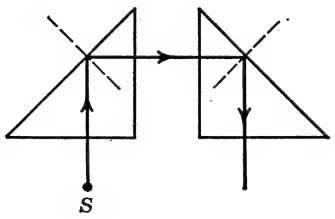
45°
totalmente

31.



Complete la trayectoria que sigue este rayo de luz a través de estos prismas.

* * * * *



32. Los prismas como el de la Fig. 3 del panel 6 y los mostrados en el marco anterior se emplean para cambiar las trayectorias de los rayos de luz. Dos ejemplos de su aplicación lo son los periscopios y los binoculares prismáticos. El cambio de dirección del rayo de luz se debe a

. . . . . .

* * * * *

la reflexión total interna

Sección 5. Producción de imágenes por refracción. Superficies refractoras de las lentes. La fórmula del fabricante de lentes.

1. Vea el panel 7.

La letra en la esquina superior derecha es una . . .

* * * * *

F

2. Panel 7, Fig. 1.

En la figura, $\theta_2 > \theta_1$. Esto significa que el índice de refracción n_2 es (mayor/menor) que el n_1.

* * * * *

menor.

3. Panel 7, Fig. 1.

S es la fuente luminosa de la que parte el rayo de luz SBE. Para un ojo situado en E la luz parece venir de (S/S_1).

* * * * *

S_1

4. Panel 7, Fig. 1.
A S_1 la llamamos imagen de S. S_1 y S no están en el mismo punto porque el rayo de S se ..... en B.
* * * * *
refracta

5. Panel 7, Fig. 1.
Examine el $\triangle ASB$. Por geometría podemos demostrar que $\angle ASB = \theta_1$. En este triángulo, $\tan \angle ASB =$ .... *(use los lados de* $\triangle ASB$*)*.
$\tan \theta_1 =$ .... *(use los lados de* $\triangle ASB$*)*.
* * * * *
$\frac{AB}{AS}$
$\frac{AB}{AS}$

6. Panel 7, Fig. 1.
Examine el $\triangle AS_1B$. Por geometría podemos demostrar que $\angle AS_1B = \theta_2$.
$\tan \angle AS_1B =$ .....
y $\tan \theta_2 =$ ..... } *(use los lados del* $\triangle AS_1B$*)*.
* * * * *
$\frac{AB}{AS_1}$
$\frac{AB}{AS_1}$

7. Panel 7, Fig. 1.
Definimos AS como la distancia del objeto a la superficie refractora. Rotúlela p. Entonces definimos AS_1 como la distancia de ... . a la superficie refractora; rotúlela q. Usando p, q y (AB), $\tan \theta_1 =$ ..... y $\tan \theta_2 =$ .....
* * * * *
la imagen
$\frac{AB}{p}$
$\frac{AB}{p}$

8. Examine su tabla de valores trigonométricos (en el panel 3) y compare los valores de los senos y las tangentes de 0° a 10°. Si θ_1 y θ_2 del panel 7 están entre 0° y 10°, podemos aproximar:

tan $\theta_1 \approx$ sen θ_1

tan $\theta_2 \approx$ .....

* * * * *

sen θ_2

9. sen $\theta_1 \approx$ tan θ_1 y sen $\theta_2 \approx$ tan θ_2, sólo si θ_1 y θ_2 son menores que ....°.

* * * * *

10

10. Panel 7, Fig. 1.

(1) En la sección 5 de este capítulo derivamos una ecuación que relaciona a n_1, n_2, θ_1 y θ_2 como sigue: .....

(2) En esta sección demostramos que tan $\theta_1 =$ ..... y tan $\theta_2 =$ ..... *(use p, q* y *AB),* y que sen $\theta_1 \approx$ ..... y sen $\theta_2 \approx$ ....., si θ_1 y θ_2 son menores de 10°.

* * * * *

n_1 sen $\theta_1 = n_2$ sen θ_2

$\frac{AB}{p}$ y $\frac{AB}{q}$

tan θ_1 y tan θ_2

11. Panel 7, Fig. 1.

(1) n_1 sen $\theta_1 = n_2$ sen θ_2.

(2) Puesto que para θ_1 y θ_2 muy pequeños, sen $\theta_1 \approx$ tan θ_1 y sen $\theta_2 \approx$ tan θ_2, en (1) substituimos sen θ_1 y sen θ_2 para obtener:

(3) n_1 ..... = n_2 .....

* * * * *

(n_1) tan $\theta_1 =$ (n_2) tan θ_2

12. Panel 7, Fig. 1.

(1) n_1 tan $\theta_1 = n_2$ tan θ_2.

(2) Pero tan $\theta_1 = \frac{(AB)}{p}$ y tan $\theta_2 = \frac{(AB)}{q}$

(3) Substituyendo en (1) los valores tan θ_1 y tan θ_2 con los obtenidos en (2), (1) se convierte en: .....

* * * * *

$n_1 \frac{AB}{p} = n_2 \frac{AB}{q}$

13. Panel 7, Fig. 1.

Hemos demostrado que para ángulos de incidencia y de refracción, (pequeños/grandes)

$$n_1 \frac{AB}{p} = n_2 \frac{AB}{q}$$

Despejando q: $q =$ .....

* * * * *

pequeños

$$q = \frac{n_2}{n_1} p \quad \left(\frac{\cancel{AB}}{\cancel{AB}}\right)$$

$$= \frac{n_2}{n_1} p$$

14. Panel 7, Fig. 1.

Suponga que la fuente luminosa está dentro del agua y que el otro medio es el aire *(use* $n = 1$*)*. Si la distancia del objeto a la superficie del agua es de 10 cm, calcule la distancia de la imagen a la superficie.

* * * * *

$$q = \frac{n_2}{n_1} p = \frac{1}{1.33} (10 \text{ cm}) = 7.5 \text{ cm}$$

15. Cuando usted pone una moneda en el fondo de un vaso de 12 cm de alto y lo llena con agua, la moneda aparenta estar más (cerca/lejos) de la superficie.

* * * * *

cerca

16. Calcule la distancia de la imagen de la moneda del marco anterior.

* * * * *

$$q = \frac{n_2}{n_1} p = \frac{1}{1.33} (12 \text{ cm}) = 9 \text{ cm}$$

17. Un observador sumergido en una alberca ve un objeto que está colocado a 1 m por encima de la superficie del agua. El objeto aparenta estar más (cerca/lejos) de la superficie de lo que realmente está.

* * * * *

lejos

18. Calcule la distancia de la imagen del marco anterior.

* * * * *

$$q = p \frac{n_2}{n_1} = (1 \text{ m}) \frac{(1.33)}{1} = 1.33 \text{ metros}$$

19. Panel 7. Vea la Fig. 2.

La luz de S pasa por dos medios transparentes (con índices de refracción n_1 y n_2). La superficie entre estos medios es (plana/curva) y la normal a la superficie es perpendicular también a una ..... a la superficie.

* * * * *

curva
tangente

20. Panel 7, Fig. 2.

$n_2 > n_1$. El rayo refractado se desvía (acercándose a/alejándose de) la normal. En otras palabras, θ_2 es (mayor/menor) que θ_1.

* * * * *

acercándose a
menor

21. Panel 7. Refiérase a la Fig. 3.

Un rayo de luz proveniente de S y propagándose en el aire incide en la superficie de un trozo de vidrio limitado por superficies curvas. En A, el rayo se refracta (acercándose a/alejándose de) la normal. Explique.

* * * * *

acercándose a [porque el índice de refracción del medio refractor (el vidrio) es mayor que el del medio incidente (el aire)].

22. Panel 7, Fig. 3.

El rayo, propagándose ahora en el vidrio, incide en la otra superficie en el punto B. En B el medio refractor es el ..... y el rayo refractado se desvía (acercándose a/alejándose de) la normal. Explique.

* * * * *

aire
alejándose de [porque el índice de refracción del medio refractor (el aire), es menor que el del medio incidente (el vidrio)].

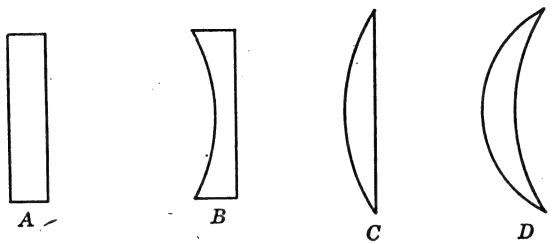
23. Panel 7.

Un trozo de material transparente limitado por dos superficies curvas, o por una curva y una plana, se llama *lente*. El objeto ilustrado en la Fig. 3 (es/no es) una lente.

* * * * *

es

24.



Las anteriores son secciones de objetos de material transparente. ¿Cuál no es una lente? Explique.

* * * * *

A (ninguna de sus superficies es curva).

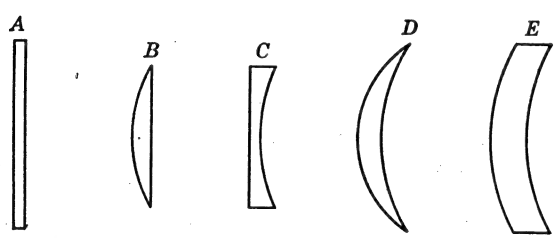
25. Panel 7, Fig. 3.

C y C_1 son los centros de curvatura de las superficies de esta lente, la línea que los une es el eje principal de la lente y *O* es el centro óptico de la misma. El rayo que parte de *S* es paralelo al .... de la lente y se desvía (acercándose a/alejándose de) él al pasar a través de la lente.

* * * * *

eje principal
acercándose a

26. En general, cuando una lente tiene un índice de refracción mayor que el medio que la rodea y su espesor es mayor en el centro que en el borde, un rayo de luz paralelo a su eje principal se desviará acercándose a dicho eje. A esta lente se le llama *convergente.*



Todas estas lentes son de vidrio y se usan en el aire o en el vacío. ¿Cuáles de ellas son convergentes?

* * * * *

B y *D*

27. Panel 7. Refiérase a la Fig. 4.

Este es un trozo de material transparente limitado por superficies

curvas cuyo nombre es ..... El punto O es su ..... óptico, y la línea que pasa por C y C_1 se llama su ....

* * * * *

lente
centro
eje principal

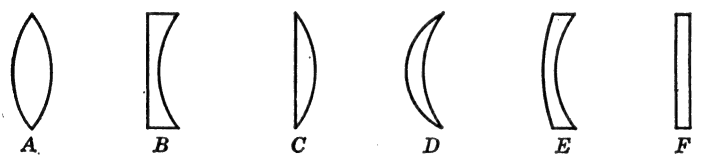
28. Panel 7, Fig. 4.

A medida que el rayo de luz que proviene de S paralelo al eje principal pasa a través de la lente se desvía (acercándose a/alejándose del) eje principal.

* * * * *

alejándose del

29. En general, cuando el espesor de una lente es mayor en su borde que en su centro y tiene un índice de refracción mayor que el del medio que la circunda, un rayo de luz paralelo a su eje principal se desvía alejándose de éste. Esta lente se llama *divergente.* Las siguientes lentes son de vidrio y se usan en el aire o en el vacío:



¿Qué lentes son convergentes?
¿Cuáles son divergentes?

* * * * *

A, C, D
B, E

30. En este curso supondremos que nuestras lentes son de vidrio y que el medio circundante es el aire o el vacío. Cuando una lente tiene mayor espesor en su borde que en su centro, se llama ..... y la lente que tiene mayor espesor en el centro que en el borde es la .....

* * * * *

divergente
convergente

31. Un rayo de luz paralelo al eje principal de una lente se desvía acercándose dicho eje al pasar a través de la lente; esto indica que es una lente ..... Un rayo de luz paralelo al eje principal

de una lente se desvía alejándose del eje a medida que atraviesa la lente, lo que indica que se trata de una lente .....
* * * * *

convergente
divergente

32. Panel 7. Vea la Fig. 5.

Una propiedad importante de las lentes convergentes es que los rayos de luz paralelos a su eje principal, convergen en un punto después de atravesar la lente. Recordando nuestro estudio de los espejos cóncavos, vemos que este punto se llama ..... de la lente.
* * * * *

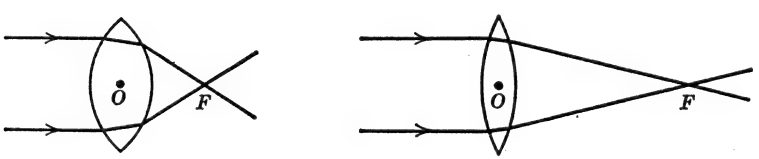
foco

33. Panel 7, Fig. 5.

Recordando una vez más nuestro estudio de los espejos esféricos cóncavos, vemos que la distancia entre el centro óptico de la lente y su foco (*OF* en esta figura) se llama ..... focal de la lente.
* * * * *

distancia

34.



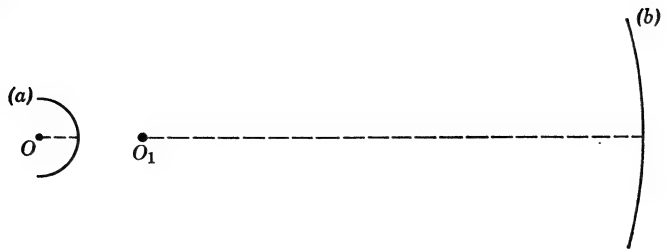
Estas dos lentes son del mismo tipo de vidrio, es decir, tienen el mismo índice refringente, pero difieren en su espesor. La lente de mayor espesor tiene una distancia focal (mayor/menor).
* * * * *

menor

35. Las distancias focales de dos lentes fabricadas con vidrio del mismo índice de refracción, dependen necesariamente de su .....
* * * * *

espesor

36.

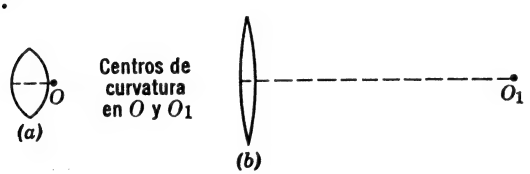


La *curvatura* del arco *(a)* es mayor que la del arco *(b)*. *O* y O_1 son sus respectivos centros. Las curvaturas de los arcos circulares son (directamente/inversamente) proporcionales a sus radios.

* * * * *

inversamente

37.



¿Qué lente tiene mayor espesor, (a/b)?

¿Cuál tiene superficies de mayor curvatura, (a/b)?

¿Cuál tiene mayor radio de curvatura, (a/b)?

* * * * *

(a); *(a)*; *(b)*

38. El espesor de una lente convergente depende (directamente/inversamente) de la curvatura de las superficies que la limitan. La curvatura de una superficie es (directamente/inversamente) proporcional a su radio de curvatura. Esto significa que a medida que aumenta el radio de curvatura de las superficies limitadoras, el espesor de una lente tiende a (aumentar/disminuir).

* * * * *

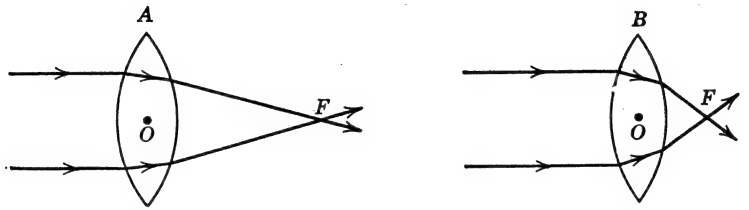
directamente
inversamente
disminuir

39. Esto significa que cualquier ecuación que desarrollemos para medir la distancia focal de una lente convergente, deberá referirse a los ..... de ..... de las superficies que limitan a la lente.

* * * * *

radios (de) curvatura

40.



Estas lentes tienen el mismo espesor; el índice de refracción de *B* es mayor que el de *A*. Estas figuras indican que la distancia focal aumenta al (aumentar/disminuir) el índice de refracción.

* * * * *

disminuir

41. Una fórmula general para calcular la distancia focal de una lente convergente requiere matemáticas complicadas, pero ha sido deducida y se llama fórmula del fabricante de lentes:

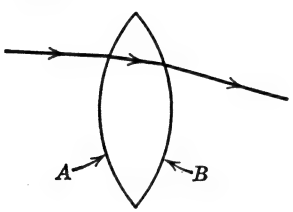
$$\frac{1}{f} = (n - 1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)$$

Examine las variables que contiene. La fórmula del fabricante de lentes explica el hecho de que la distancia focal aumenta a medida que disminuye el ..... de ..... y a medida que aumentan los ..... de ..... de las superficies que limitan la lente.

* * * * *

índice (de) refracción
radios (de) curvatura

42. Panel 7.



La Fig. 6 es una lista de reglas para determinar los signos de r_1 y r_2 en la fórmula del fabricante. En la figura de este marco, la superficie *A* es convexa respecto al rayo de luz, y su radio de curvatura r_1 es (positivo/negativo).

* * * * *

positivo

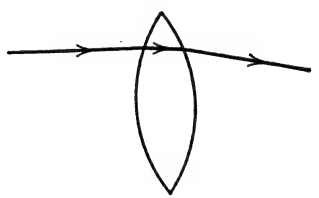
43. Lea en el panel 7, Fig. 6, las reglas para los signos.

En la figura del marco anterior, la superficie B es (convexa/cóncava) respecto al rayo luminoso, y r_2 de la fórmula del fabricante, aplicado a esta lente, será (positivo/negativo).

* * * * *

cóncava
negativo

44.



Esta lente es de un vidrio cuyo índice de refracción es $n = 1.5$; el radio de curvatura de ambas superficies es de 10 cm. Si usted fuera a emplear la fórmula del fabricante para calcular su distancia focal, usaría:

$r_1 =$ ..... cm
$r_2 =$ ..... cm

* * * * *

10
−10

45. $\dfrac{1}{f} = (n-1)\left(\dfrac{1}{r_1} - \dfrac{1}{r_2}\right)$

Substituya con los datos del marco anterior y despeje f.

$f =$ ..... cm

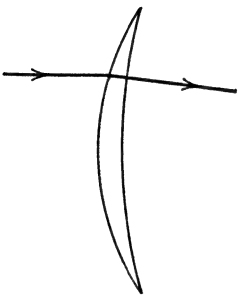
* * * * *

$$\frac{1}{f} = (1.5-1)\left(\frac{1}{10} - \frac{1}{-10}\right) = (.5)\left(\frac{1}{10} + \frac{1}{10}\right)$$

$$= (.5)\left(\frac{2}{10}\right) = \frac{.5}{5} = \frac{1}{10}$$

$f = 10$ cm

46.



Esta lente tiene un índice de refracción $n = 1.5$ y sus radios de curvatura son de 10 cm y 15 cm. Al substituir en la fórmula del fabricante:

(a) r_1 y r_2 son positivos
(b) r_1 y r_2 son negativos
(c) r_1 es positivo y r_2 negativo
(d) r_1 es negativo y r_2 positivo

Escoja *(a)*, *(b)*, *(c)* ó *(d)* y explique.

* * * * *

(a) (porque ambas superficies son convexas respecto al rayo de luz).

47. Calcule la distancia focal de la lente descrita en el marco anterior.

* * * * *

$$\frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) = (1.5-1)\left(\frac{1}{10} - \frac{1}{15}\right) = (.5)\left(\frac{1}{30}\right) = \frac{1}{60}$$

$f = 60$ cm

48. Refirámonos a la Fig. 4 del panel 7.

El radio de curvatura de ambas superficies es de 10 cm. Cuando aplicamos la fórmula de los fabricantes de lentes:

(a) r_1 y r_2 son negativos
(b) r_1 y r_2 son positivos
(c) r_1 es positivo y r_2 negativo.
(d) r_1 es negativo y r_2 positivo.

Elija *(a)*, *(b)*, *(c)* ó *(d)* y explique.

* * * * *

(d) (porque la primera superficie es cóncava respecto al rayo de luz y la segunda es convexa respecto al rayo).

49. Panel 7.

Con los datos del marco anterior calcule la distancia focal de la lente de la Fig. 4. Use $n = 1.5$.

* * * * *

$$\frac{1}{f} = (1.5) - 1)\left(-\frac{1}{10} - \frac{1}{10}\right) = (0.5)\left(-\frac{2}{10}\right) = -\frac{1}{10}$$

$f = -10$ cm (¿Qué cree Ud. que significa el signo negativo?).

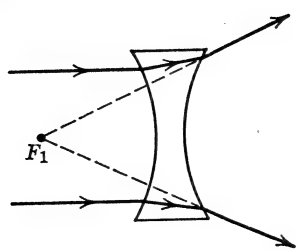
50. Panel 7, Fig. 4.

Puesto que ésta es una lente ....., los rayos paralelos al eje principal (convergirán/no convergirán) en el lado derecho. Esto significa que (hay/no hay) foco en el lado derecho de la lente.

* * * * *

divergente
no convergirán
no hay

51.



A un observador colocado en el lado derecho de esta lente, le parecerá que los rayos divergentes vienen desde un mismo punto F_1. Puesto que sabemos que estos rayos no vienen realmente de ese punto, éste es un foco (real/virtual).

* * * * *

virtual

52. Una distancia focal de -10 cm calculada para una lente mediante la fórmula de los fabricantes, indica que la lente es ....., con un foco .....

* * * * *

divergente
virtual

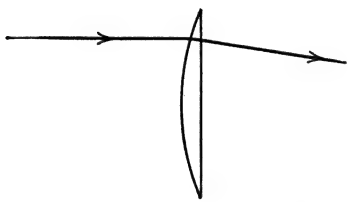
53. Lea de nuevo la regla (4) de la Fig. 6 del panel 7.

Esta lente tiene una superficie convexa y una plana. El valor de $\frac{1}{r_2}$ es ....

* * * * *

0, ó cero

54.



Esta lente planoconvexa tiene un radio de curvatura de 20 cm y un índice refringente de 1.5. Al substituir con valores en la fórmula de los fabricantes, $\frac{1}{r_1} =$ ..... y $\frac{1}{r_2} =$ .....

* * * * *

$\frac{1}{20}$

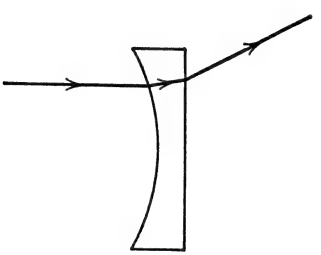
cero ó 0

55. Calcule la distancia focal de la lente descrita en el marco anterior.

$\frac{1}{f} = (1.5 - 1)(\frac{1}{20} - 0) = (0.5)(\frac{1}{20}) = \frac{1}{40}$

$f = 40$ cm

56.



El radio de curvatura de la superficie curva de esta lente es de 5 cm. Usando $n = 1.5$ y la fórmula del fabricante, encuentre su distancia focal.

* * * * *

$$\frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right) = (1.5-1)\left(\frac{1}{-5} - 0\right)$$

$$= (.5)\left(-\frac{1}{5}\right) = -\frac{1}{10}$$

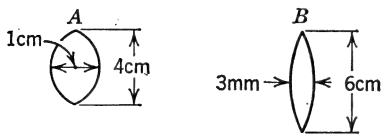
$f = -10$ cm

57. ¿Qué significa el signo negativo en la respuesta del marco anterior?

* * * * *

Indica que la lente es divergente y que su foco es virtual.

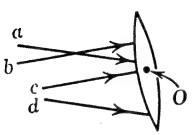
58. Si el espesor de una lente convergente es pequeño respecto a su diámetro, decimos que es una lente *delgada*. Conforme a esta descripción, ¿cuál de las siguientes lentes puede ser considerada como delgada?



* * * * *

B

59. Una propiedad importante de las lentes delgadas es el hecho de que *cualquier* rayo que pase por su centro óptico *no* se refracta apreciablemente. La lente mostrada aquí es una lente delgada con centro óptico en *O*.

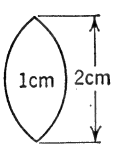


¿Cuáles rayos la atravesarán sin refractarse apreciablemente?

* * * * *

a, c

60.



La fórmula del fabricante se aplica únicamente a las lentes delgadas. (Podemos/no podemos) calcular con relativa precisión la distancia

focal de una lente con dimensiones como las de la figura anterior. Explique.

* * * * *

No podemos, porque no es una lente delgada.

Sección 6. Formación de imágenes por lentes delgadas

1. Refirámonos al panel 8.
   La letra que está en la esquina superior derecha es una ...

T

2. Panel 8.
   La línea que une a F_1 con F y que pasa por el centro óptico se llama eje principal de la lente. En la Fig. 1, los rayos paralelos al eje principal se (reflejan/refractan) al atravesar la lente en tal forma que al emerger de ella pasan por su .....

* * * * *

refractan
foco

3. Panel 8.
   La lente que se ilustra aquí es delgada. En la Fig. 2, escogemos dos rayos que parten de A; uno pasa por el centro óptico y (se/no se) refracta al atravesar la lenta; el otro es paralelo al .... y (se/no se) refracta al atravesarla.

* * * * *

no se
eje principal
se

4. Un rayo que pasa por el .... de una lente ..... no se refracta.

* * * * *

centro óptico
delgada

5. Panel 8, Fig. 2.
   Después de emerger de la lente, estos dos rayos de A se intersectan en el punto .... Este punto se llama ..... de A.

* * * * *

A_1
imagen

6. Panel 8, Fig. 2.

Para localizar la imagen de *B* escogemos dos rayos procedentes de este punto; uno de ellos pasa por el .... de la lente y no se refracta; el otro es ..... al eje principal y se refracta en forma tal que después de atravesar la lente pasa por el ..... de ésta. La imagen de *B* es el punto en que estos rayos .....

* * * * *

centro óptico
paralelo
foco
convergen (se intersectan, se juntan, se cruzan, etc.).

7. Panel 8.

En la Fig. 1 el objeto está a una distancia infinitamente grande de la lente, o sea que *p* (distancia al objeto) tiende al infinito. En este caso la imagen es un ..... localizado en .....

* * * * *

punto
F, el foco, etc.

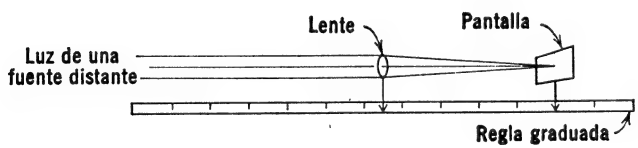
8. Panel 8, Fig. 1.

Sean: p = distancia al objeto y q = distancia a la imagen.
f = distancia focal. Cuando $p \to \infty$, q = ...

* * * * *

f

9.



Un método experimental para encontrar la distancia focal de una lente convergente consiste en enfocar en una pantalla la luz del Sol o de algún objeto luminoso relativamente distante, y medir .....
..... *(complete).*

* * * * *

la distancia entre el centro de la lente y la pantalla.

10. Panel 8. Refiérase a la Fig. 2.

En este caso el objeto está colocado a una distancia de la lente (mayor/menor) que el doble de la distancia focal. La imagen se forma a una distancia de la lente (mayor/menor) que el doble de la distancia

focal. La imagen está en el (mismo lado/lado opuesto) de la lente y es (erecta/invertida). La imagen (la/no la) forman realmente los rayos de luz que atraviesan la lente, por lo tanto, es (real/virtual).

* * * * *

mayor
menor
lado opuesto
invertida
la
real

11. Panel 8, Fig. 2.

En una lente (divergente/convergente), si $p > 2f$, entonces q (>/=/<) $2f$ y q (>/=/<) f. La imagen es (mayor/menor) y (más/menos) brillante que el objeto.

* * * * *

convergente
<
>
menor
más

12. Panel 8. Refirámonos a la Fig. 3.

En este caso, $p = 2f$

$q = \ldots$. en función de f.

El objeto y la imagen están en (el mismo lado/lados opuesto) de la lente. La imagen es (real/virtual), (erecta/invertida) y su tamaño está (agrandado/disminuido/igual).

* * * * *

$2f$
lados opuestos
real
invertida
igual

13. Panel 8. Refiérase a la Fig. 4.

En este caso el objeto está situado a una distancia de la lente entre una y ..... distancias focales. La imagen se produce a una distancia de la lente (mayor que/menor que/igual a) dos distancias focales, está (agrandada/disminuida), en el (mismo lado/lado opuesto) de la lente, es (real/virtual), (erecta/invertida) y (más/menos) brillante que el objeto.

* * * * *

dos, ó 2

mayor que
agrandada
lado opuesto
real
invertida
menos

14. Panel 8. Repase las Figs. 2, 3 y 4.

Cuando $p > f$, la imagen es (real/virtual) y está (agrandada/erecta/en el lado opuesto de la lente/en el mismo lado de la lente/disminuida/invertida) *(escoja más de una respuesta)*. Cuando el objeto está a una distancia de la lente entre una y dos distancias focales, la imagen es (real/virtual) y está (invertida/erecta/en el mismo lado de la lente/en el lado opuesto de la lente).

* * * * *

real, en el lado opuesto de la lente, invertida
real, invertida, en el lado opuesto de la lente.

15. Panel 8, Figs. 2, 3 y 4.

Cuando $p > 2f$, $q >$ .... y $q <$ .....

* * * * *

f; $2f$

16. Panel 8, Figs. 2, 3 y 4.

Cuando $p < 2f$, pero $p > f$, $q >$ .....

* * * * *

$2f$

17. Panel 8, Figs. 2, 3 y 4.

Cuando p = $2f$, q ($<$/=/$>$) $2f$, y q ($<$/=/$>$) f.

* * * * *

=; >

18. Panel 8. Refirámonos a la Fig. 5.

El objeto AB está situado a una distancia p = ... (Se/no se) forma imagen. Cuando se trazan dos rayos a partir de A, uno paralelo al eje principal y el otro pasando por el centro óptico, (se/no se) intersectan porque emergen de la lente .....

* * * * *

f
no se
no se
paralelos

19. Panel 8. Veamos la Fig. 6.

En este caso el objeto está situado entre la lente y su ..... En símbolos, $p <$ ....

* * * * *

foco
f

20. Panel 8, Fig. 6.

Los rayos que parten de A (se/no se) juntan después de atravesar la lente. En este caso (es/no es) posible una imagen real.

* * * * *

no se
no es

21. Panel 8, Fig. 6.

El ojo de un observador interpretará estos rayos como si partieran de A_1. La imagen A_1B_1 que se forma cuando se sitúa el objeto AB entre la lente y su foco es (real/virtual), está (invertida/erecta), (agrandada/disminuida) y (en el mismo lado/en el lado opuesto) de la lente que el objeto.

* * * * *

virtual
erecta
agrandada
en el mismo lado.

22. Panel 8. Refirámonos a la Fig. 7.

Esta lente difiere de las ilustradas en las Figs. 1 a 6 debido a que es ..... La imagen que forma de AB es (real/virtual), está (erecta/invertida/disminuida/agrandada) y en el (mismo lado/lado opuesto) de la lente. *(Escoja cuantas respuestas se apliquen.)*

* * * * *

divergente
virtual, erecta, disminuida, en el mismo lado.

23. Basándose en su estudio de las Figs. 1 a 7 del panel 8, conteste "sí" o "no" a cada una de las siguientes expresiones:

(1) Las imágenes reales están erectas.
(2) Las imágenes virtuales están erectas.
(3) Los objetos y sus imágenes virtuales están en el mismo lado de la lente.
(4) Las imágenes virtuales siempre están agrandadas.
(5) Las imágenes reales siempre están agrandadas.
(6) Las imágenes reales están invertidas.

* * * * *

(1) no
(2) sí
(3) sí
(4) no
(5) no
(6) sí

24. Cuando tratamos de los espejos esféricos cóncavos y convexos usamos una ecuación que relacionaba las variables p, q y f. Esta ecuación es:

$\frac{1}{f} =$ .....

* * * * *

$\frac{1}{p} + \frac{1}{q}$ (que también se emplea en las lentes).

25. En la ecuación de las lentes: $\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q}$; se aplican las siguientes reglas para los signos:

(1) p siempre es positiva.
(2) La distancia focal de una lente *convergente* siempre es positiva; la de una *divergente,* siempre negativa.
(3) q es positiva cuando la imagen y el objeto están en lados opuestos de la lente; q es negativa cuando la imagen y el objeto están en el mismo lado de la lente.

En el panel 8, Fig. 6:

p es (positiva/negativa)
q es (positiva/negativa)
f es (positiva/negativa).

* * * * *

positiva
negativa
positiva

26. Cuando usamos la fórmula $\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q}$ en la figura 7 del panel 8:

f es (positiva/negativa)
p es (positiva/negativa)
q es (positiva/negativa)

* * * * *

negativa
positiva
negativa

27. Panel 8.

En la Fig. 2, sean: $f = 10$ cm y $p = 30$ cm. Calcule q.

* * * * *

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q}$$

$$\frac{1}{10} = \frac{1}{30} + \frac{1}{q}$$

$$3q = q + 30$$
$$2q = 30$$
$$q = 15 \text{ cm}$$

28. Panel 8.

En la Fig. 4, sea la distancia focal de 10 cm y la distancia al objeto de 15 cm. Calcule la distancia del centro óptico de la lente a la imagen.

* * * * *

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q}$$

$$\frac{1}{10} = \frac{1}{15} + \frac{1}{q}$$

$$3q = 2q + 30$$
$$q = 30 \text{ cm}$$

29. Panel 8.

En la Fig. 6, dados $f = 10$ cm y $p = 5$ cm, calcule q.

* * * * *

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q}$$

$$\frac{1}{10} = \frac{1}{5} + \frac{1}{q}$$

$$q = 2q + 10$$
$$-q = 10$$
$$q = -10 \text{ cm}$$

30. El signo negativo de la respuesta al marco anterior indica que el objeto y la imagen están en (el mismo lado/lados opuestos) de la lente; también significa que la imagen es (real/virtual) y que está (erecta/invertida).

* * * * *

el mismo lado; virtual; erecta

31. Panel 8.

Suponga que en la Fig. 7, $OF_1 = 10$ cm; entonces $f =$ ..... cm.

* * * * *

-10 (no olvide el signo negativo; es una lente divergente).

32. Panel 8, Fig. 7.

Dados $OF_1 = 10$ cm y un objeto situado a 20 cm del centro óptico, calcule la distancia a la imagen y describa ésta.

* * * * *

$$-\frac{1}{10} = \frac{1}{20} + \frac{1}{q}$$

$$-2q = q + 20$$

$$-3q = 20$$

$$q = -6.7 \text{ cm}$$

La imagen y el objeto están en el mismo lado de la lente; la imagen es virtual y está erecta.

33. Se coloca un objeto a 50 cm de una lente delgada; la imagen que se forma está erecta y a 10 cm del centro óptico, en el mismo lado de la lente en que está el objeto. Calcule la distancia focal de esta lente (convergente/divergente).

* * * * *

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{50} + \frac{1}{-10} = \frac{1}{50} - \frac{1}{10}$$

$$50 = f - 5f$$

$$4f = -50$$

$$f = -2.5 \text{ cm}$$

La distancia focal negativa indica una lente *divergente.*

34.

Los radios de curvatura de esta lente (de izquierda a derecha) son de 10 cm y 15 cm; su índice de refracción es de 1.5. Calcule su distancia focal.

* * * * *

$$\frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)$$

$$= (1.5-1)\left(\frac{1}{10} - \frac{1}{-15}\right)$$

$$= (0.5)\left(\frac{1}{10} + \frac{1}{15}\right)$$

$$= (0.5)\left(\frac{3+2}{30}\right)$$

$$= (0.5)\left(\frac{5}{30}\right) = \frac{2.5}{30} = \frac{1}{12}$$

$f = 12$ cm

35. Se coloca un objeto a 2 cm de la lente descrita en el marco anterior. Describa la imagen, diga dónde se localiza y calcule su distancia.

* * * * *

$1/12 = 1/2 + 1/q$
$q = 6q + 12$
$-5q = 12$
$q = -2.4$ cm

La imagen está situada a 2.4 cm del centro óptico, en el mismo lado de la lente en que está el objeto; es virtual y está erecta.

36. Se sitúa un objeto a 10 cm del centro óptico de una lente delgada. La imagen que se produce es virtual, está erecta y a 25 cm del centro óptico, en el mismo lado de la lente en que está el objeto. Calcule la distancia focal de esta lente (convergente/divergente).

* * * * *

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{10} - \frac{1}{25}$$

$50 = 5f - 2f$
$3f = 50$
$f = 16.7$ cm
convergente

37. Cuando estudiamos los espejos cóncavos encontramos que la amplificación (M) quedaba definida con el cociente $\frac{\text{tamaño de la imagen}}{\text{tamaño del objeto}}$.

En función de p y q: $\dfrac{\text{tamaño de la imagen}}{\text{tamaño del objeto}} = \ldots\ldots\ldots$

* * * * *

$\dfrac{q}{p}$

38. La misma definición es apropiada para las imágenes que producen las lentes delgadas. En la Fig. 2 del panel 8, sean: altura de $AB = 12$ cm y $f = 5$ cm. Si $p = 15$ cm, $q = \ldots\ldots$ cm.

* * * * *

$\dfrac{1}{f} = \dfrac{1}{p} + \dfrac{1}{q}$

$\dfrac{1}{5} = \dfrac{1}{15} + \dfrac{1}{q}$

$3q = q + 15$

$q = 7.5$ cm

39. Panel 8, Fig. 2.

Puesto que ahora conocemos p, q y el tamaño del objeto, el tamaño de la imagen será de $\ldots\ldots$ cm.

* * * * *

$\dfrac{\text{tamaño de la imagen}}{\text{tamaño del objeto}} = \dfrac{q}{p}$

$\dfrac{\text{tamaño de la imagen}}{12 \text{ cm}} = 7.5/15$

tamaño de la imagen $= (7.5/15)\,(12 \text{ cm}) = 6$ cm

40. Panel 8, Fig. 4.

Dados: $f = 10$ cm

$p = 15$ cm

altura de $AB = 12$ cm

Calcule la altura de A_1B_1.

* * * * *

$\dfrac{1}{10} = \dfrac{1}{15} + \dfrac{1}{q}$

$3q = 2q + 30$

$q = 30$ cm

tamaño de la imagen $= \dfrac{q}{p} \times$ tamaño del objeto

$= (30/15)\,(12) = 24$ cm

41. Panel 8.

En la Fig. 6, si $f = 10$ cm
$p = 5$ cm
altura del objeto $= 3$ cm,
calcule la altura de la imagen. Su respuesta debe tener signo negativo. ¿Qué significa este signo negativo para la imagen?

* * * * *

$$\frac{1}{10} = \frac{1}{5} + \frac{1}{q}$$

$$q = 2q + 10$$
$$q = -10 \text{ cm}$$

$$\text{altura de la imagen} = \frac{q}{p} \times \text{altura del objeto}$$

$$\left(\frac{-10}{5}\right) (3 \text{ cm}) = -6 \text{ cm}$$

El signo negativo indica que la imagen es virtual, que está erecta y en el mismo lado de la lente en que se encuentra el objeto.

Sección 7. Dispersión y color; la aberración cromática; la lente acromática

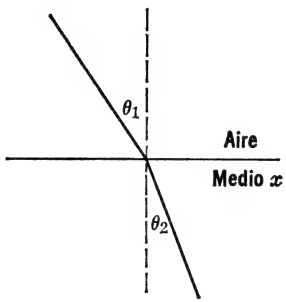
Aquí completamos nuestro estudio cuantitativo de la óptica geométrica. Hay fenómenos ópticos (que se consideran en los capítulos 4 y 5) que requieren un conjunto más extenso de hipótesis que las que hemos formulado hasta ahora, y que son objeto de consideración de una rama de la ciencia de la luz llamada *óptica física* u óptica ondulatoria.

Sin embargo, antes de continuar con las ondas examinaremos otro fenómeno asociado a la refracción, o sea el color. Desde hace mucho tiempo se ha observado que la luz blanca frecuentemente se descompone en diversos colores cuando pasa a través de ciertos medios refringentes, como por ejemplo, los elementos de cristal de un candil. El filósofo y matemático Descartes explicó la formación del arco iris como debida a las múltiples refracciones y a la reflexión interna de la luz solar en las gotas de lluvia. Fue probablemente Isaac Newton quien realizó la primera serie exhaustiva de experimentos, para demostrar que la luz blanca se podía analizar en una banda de colores monocromáticos (llamada espectro), mediante un prisma de vidrio flint, y que estos colores se podían recombinar para producir luz blanca.

Dicho sea de paso, la obra *Opticks,* de Newton, en la que describe estos experimentos es aún, después de cientos de años, clásica en la literatura de la física experimental.

En la sección 7 de este capítulo trataremos sobre esta *dispersión* de la luz policromática en sus colores monocromáticos; en el capítulo 5 consideraremos en detalle la física de los espectros luminosos.

1.



Sea V = rapidez de propagación de la luz en el vacío (o en el aire) y V_x = rapidez de propagación de la luz en algún otro medio; θ_1 es el ángulo de incidencia y θ_2 el de refracción.

En la sección 3 de este capítulo demostramos que $\frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = \ldots$, en función de V_x y V.

* * * * *

$\frac{V}{V_x}$

2. $\frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = \frac{V}{V_x}$

Esto nos indica que el ángulo de refracción (aumenta/disminuye) al aumentar V_x.

* * * * *

aumenta

3. Expresémoslo en otra forma: a medida que el valor de V_x se acerca al de V, la magnitud θ_2 (se acerca a/se aleja de/permanece igual respecto a) la magnitud de θ_1, y la desviación que tiene lugar en el medio refringente (aumenta/disminuye/permanece igual).

* * * * *

se acerca a
disminuye

4. Cuanto mayor sea la rapidez de la luz en un medio refringente tanto (mayor/menor) es la refracción que sufre un rayo al pasar del aire a ese medio.

* * * * *

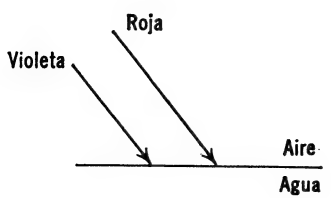
menor

5. Experimentalmente se ha demostrado que en el vacío (o en el aire, para la mayoría de los fines prácticos) la luz de cualquier color se propaga con la misma rapidez. Sin embargo, en otros medios transparentes como el agua, el vidrio, etc., la luz de diferentes colores se propaga con distinta rapidez; esto significa que un rayo de luz roja y uno de luz verde sufren (la misma cantidad/cantidades diferentes) de refracción al entrar oblicuamente en un medio como el vidrio.

* * * * *

cantidades diferentes

6.



El experimento muestra que en cualquier medio transparente, excepto el ..... o el ....., la luz roja es la que se propaga con la mayor rapidez y la violeta con la menor. Un rayo de luz violeta y uno de luz roja se propagan paralelos en el aire e inciden en la superficie de otro medio; los rayos refractados (serán/no serán) paralelos.

* * * * *

aire
vacío
no serán

7. ¿Qué rayo se refractará más, el rojo o el violeta? Explique.

* * * * *

El violeta, porque su rapidez de propagación es menor.

8. Refirámonos al panel 9. La letra en la esquina superior derecha es una ...

* * * * *

X

9. Panel 9. Vea la Fig. *(a)*.

A veces, cuando usted observa una fuente de luz blanca a través del agua o de una placa gruesa de vidrio, ve una franja de colores parecida a un arco iris. La figura *(a)* sugiere una explicación. Suponga que de hecho la luz blanca se compone de luz de muchos colores diferentes, las cuales, en el aire se propagan con (la misma rapidez/diferente rapidez).

* * * * *

la misma rapidez

10. Panel 9, Fig. *(a)*.

Cuando este haz de luz blanca incide sobre una superficie de vidrio, sus colores componentes se refractan con (el mismo ángulo/diferentes ángulos), porque en este material los diferentes colores se propagan con (la misma rapidez/distinta rapidez).

* * * * *

diferentes ángulos
distinta rapidez

11. Panel 9, Fig. *(a)*.

Si la diferencia de refracción es suficientemente grande, es de suponer que se vea la luz blanca descomponerse en diferentes ..... al entrar al medio refringente.

* * * * *

colores

12. Panel 9.

Este efecto es tanto más notable cuando se produce en dos superficies refractoras. En la Fig. *(b)*, la luz blanca se refracta en las superficies *AB* y .... del prisma.

* * * * *

AC

13. Panel 9, Fig. *(b)*.

Se dice que este prisma *dispersa* la luz blanca en sus colores componentes. La banda de colores que vemos en el prisma de vidrio de un candil es un ejemplo de la .....sión de la luz blanca.

* * * * *

disper(sión)

14. En la sección 3 de este capítulo vimos que el índice de refracción absoluto de un medio transparente es: $n_x = \frac{V}{V_x}$: Esto significa que el

índice de refracción de un medio es (directamente/inversamente) proporcional a la rapidez con que la luz se propague en ese medio.

* * * * *

inversamente

15. A menor rapidez de propagación de la luz en un medio transparente, (mayor/menor) será su índice de refracción absoluto. Entonces, el experimento debe demostrar que el grado a que se disperse la luz blanca en un medio, varía (inversamente/directamente) con el índice de refracción del medio dispersor.

* * * * *

mayor
directamente

16. Repase la tabla del panel 4, Fig. *(e)*.

El efecto dispersor de un prisma como el usado en el panel 9, Fig. *(b)* es mayor con vidrio (crown/flint). Explique por qué.

* * * * *

flint (porque tiene mayor índice de refracción).

17. La Fig. *(c)* del panel 9 muestra un experimento que realizó Newton para demostrar que la luz blanca es un conjunto de colores diferentes. El primer prisma se usa para ..... la luz en sus colores componentes; el segundo para unir estos colores y producir luz .....

* * * * *

dispersar (descomponer)
blanca

18. A la luz que descompone un prisma (o algún dispositivo similar) en dos o más colores diferentes se llama luz *policromática*. La luz blanca (es/no es) policromática.

* * * * *

es

19. Panel 9.

En la Fig. *(d)*, el primer prisma ha dispersado la luz blanca en sus colores componentes; todos éstos, excepto el rojo, se interceptan con una pantalla opaca, al cual se le permite pasar a través de otro prisma. El rojo (se/no se) refracta en el segundo prisma y (se/no se) dispersa en éste.

* * * * *

se
no se

20. Panel 9, Fig. *(d)*.

La luz roja que se hace pasar a través del segundo prisma de vidrio flint (es/no es) policromática.

* * * * *

no es

21. Panel 9.

La luz que *no* se dispersa en dos o más colores distintos se llama *monocromática.* En la Fig. *(e)*, la luz amarilla que entra al prisma (es/no es) monocromática.

* * * * *

no es

22. Un haz de luz azul entra a un prisma de vidrio flint, se refracta en sus dos superficies y emerge un haz de luz azul. Este es un ejemplo de luz (monocromática/policromática).

* * * * *

monocromática

23. Panel 9.

En la Fig. *(e)*, la luz amarilla que entra al prisma se ..... en luces roja y verde. Esta amarilla es un ejemplo de luz .....

* * * * *

dispersa
policromática

24. Panel 9, Fig. *(e)*.

Explique cómo determinaría usted si la luz verde que emerge de este prisma se puede dispersar en dos o más diferentes colores.

* * * * *

Eliminando la luz roja con una pantalla y permitiendo que la verde pase a través de otro prisma.

25. Panel 9, Fig. *(e)*.

Si la luz verde se dispersa en dos o más colores, se dice que es un ejemplo de luz .....; si no se dispersa posteriormente, se dice que es luz .....

* * * * *

policromática
monocromática

26. La dispersión resulta del hecho de que diferentes colores se refractan (al mismo ángulo/a diferentes ángulos) en el mismo medio transparente.

De esto se deduce que, en un mismo medio, los índices de refracción de diferentes colores son (iguales/diferentes).

* * * * *

a diferentes ángulos
diferentes

27. Entonces, estrictamente hablando, podemos dar el índice de refracción solamente para la luz (monocromática/policromática).

* * * * *

monocromática

28. En el capítulo 5 veremos que los colores monocromáticos se pueden identificar por cantidades físicas llamadas longitudes de onda. Los índices de refracción que se dan en la Fig. *(e)* del panel 4 corresponden al amarillo monocromático. El valor para el rojo monocromático sería algo (mayor/menor). Explique.

* * * * *

menor (porque la rapidez de propagación de la luz en un medio es inversamente proporcional al índice de refracción de ese medio. La luz roja es la más rápida de todos los colores y, por lo tanto, es más rápida que la amarilla; entonces, su índice de refracción debe ser menor que el de la amarilla, en cualquier medio).

29. Panel 9. Refirámonos a la Fig. *(f)*.

Esta figura muestra una gota de agua (muy amplificada). Por *A* entra un rayo de luz blanca solar, que se ..... en sus colores componentes, comenzando en un extremo con el ....., hasta el ..... en el otro extremo.

* * * * *

dispersa
en cualquier orden: rojo, violeta.

30. Panel 9, Fig. *(f)*.

Cuando la luz roja llega a *B*, y suponiendo que su ángulo de incidencia sea mayor que el ángulo límite del agua respecto al aire, el rayo rojo se (refracta/refleja) en *B*.

* * * * *

refleja

31. Panel 9, Fig. *(f)*.

Al rayo violeta le sucede lo mismo en *C*. Cuando estos rayos reflejados inciden entonces en *D* y *E*, se (refractan/reflejan).

* * * * *

refractan

32. Panel 9, Fig. *(f)*.

El observador ve que emerge de la gota de agua (luz blanca/una banda de colores que se extiende del rojo al violeta). A este fenómeno se le llama comúnmente ....

* * * * *

una banda de colores que se extiende del rojo al violeta;
arco iris

33. Panel 9, Fig. *(f)*.

Para ver un arco iris el observador debe tener su (cara/espalda) hacia el Sol, y su (cara/espalda) hacia la niebla o llovizna de la que emerge el arco iris.

* * * * *

espalda
cara

34. Panel 9, Fig. *(f)*.

El arco iris comprende los siguientes fenómenos ópticos:

(1) La refracción y dispersión de la luz blanca en *A*.
(2) .... en *B* y *C*.
(3) La refracción y en seguida la ..... en *D* y *E*.

* * * * *

reflexión total interna
dispersión

35. ¿Puede formarse el arco iris con luz monocromática? (Sí/No). Explique.

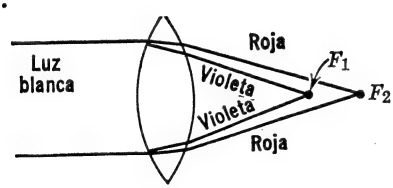
* * * * *

No (la luz monocromática no puede dispersarse).

36. La luz policromática se dispersa siempre que sufre una refracción. Cuando un haz de luz blanca pasa a través de una lente delgada, (se/no se) dispersa en algún grado. Explique.

se (porque la lente es un dispositivo cuyos efectos dependen de la refracción).

37.



Cuando un haz de luz blanca pasa por una lente delgada, la desviación de su componente roja es (máxima/mínima), y la de su componente violeta es (máxima/mínima).

* * * * *

mínima
máxima

38. En la figura del marco anterior, el foco para las componentes rojas es (F_1/F_2) y para las componentes violeta es (F_1/F_2). Si hubiere espacio para trazar la componente amarilla, su foco estaría en (F_1/F_2/ algún punto entre F_1 y F_2).

* * * * *

F_2
F_1
algún punto entre F_1 y F_2.

39. La distancia focal de una lente convergente delgada es (la misma/ diferente) para diferentes colores monocromáticos.

* * * * *

diferente

40. Cuando se usa luz policromática, el foco de una lente convergente delgada (es/no es) un punto bien definido.

* * * * *

no es

41. Una lente convergente delgada producirá imágenes nítidas sólo cuando el objeto emita, o sea iluminado, con luz (policromática/monocromática).

* * * * *

monocromática

42. Cuando se usa luz policromática en una lente delgada para producir una imagen, hay una borrosidad en el contorno de la imagen, llamada aberración cromática. La aberración cromática ocurre porque la luz ..... se ..... al pasar por la lente y emerger de ella.

* * * * *

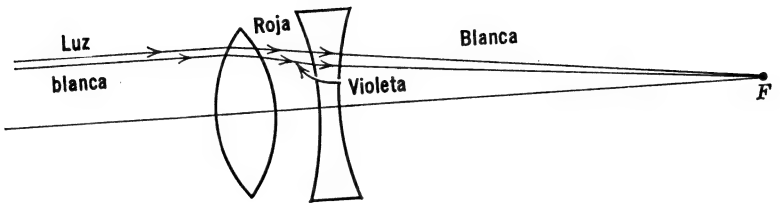
policromática
dispersa

43. La aberración cromática (puede/no puede) ocurrir en los espejos cóncavos. Explique.

* * * * *

no puede (porque la refracción, y por lo tanto la dispersión de la luz policromática, no ocurre en los espejos; éstos usan la luz reflejada para producir imágenes).

44.

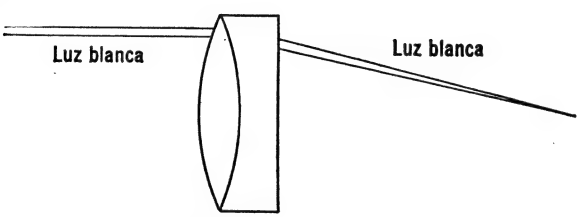


En la figura, una lente (convergente/divergente) dispersa un haz de luz blanca. Las componentes dispersadas se recombinan con una lente (convergente/divergente). En el sistema hay (un/más de un) foco.

* * * * *

convergente
divergente
un

45.



Este par de lentes unidas constituye una lente *acromática;* tal sistema (presenta/no presenta) aberración cromática.

* * * * *

no presenta

46. El sistema de lentes ilustrado en el marco anterior se conoce como lente ..... Su elemento convergente se fabrica generalmente de vidrio crown y su elemento divergente de vidrio flint. Este sistema se usa para formar imágenes con luz policromática, porque no sufre ....

* * * * *

acromática
aberración cromática

Sección 8. Repaso y problemas

1. Un rayo de luz propagándose en el aire incide oblicuamente en la superficie de un material transparente. El ángulo de incidencia es de 40°. Parte de la luz se ..... a 40° y el resto se ..... a 30°. Calcule el índice de refracción absoluto del material.

* * * * *

refleja
refracta

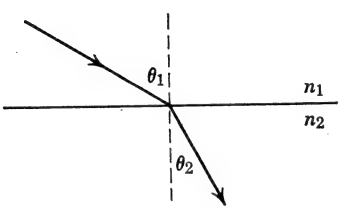
$$n = \frac{\text{sen } 40°}{\text{sen } 30°} = .643/.500 = 1.29 \quad \frac{.643}{.500} = 1.29$$

2. Un rayo de luz pasa oblicuamente del medio *a* al *b*. Si $n_a > n_b$, el rayo refractado se desvía (alejándose de/acercándose a) la normal.

* * * * *

alejándose de

3.



Escriba una ecuación que relacione a θ_1, θ_2, n_1 y n_2.

* * * * *

$n_1 \text{ sen } \theta_1 = n_2 \text{ sen } \theta_2$
o bien:

$$\frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

4. Los índices de refracción de dos medios transparentes son tales que $n_1 < n_2$. La rapidez de propagación de la luz es mayor en el medio con índice (n_1/n_2).

* * * * *

n_1

5. Se encuentra que el índice de refracción de un material transparente es 1.4; calcule el ángulo límite de los rayos de luz que pasan del material al aire.

* * * * *

$$\text{sen } \theta_c = \frac{1}{n} = \frac{1}{1.4} = .715$$

$$\theta_c \approx 46°$$

6. La luz que se propaga en un medio transparente con índice de refracción absoluto n_1 entra en otro medio con un índice de refracción absoluto n_2. Si en este caso existe ángulo límite, n_2 deberá ser (mayor/menor) que n_1. Escriba una ecuación que relacione a θ_c con n_1 y n_2.

* * * * *

menor

$$\text{sen } \theta_c = \frac{n_2}{n_1}$$

7. ¿Bajo qué condiciones se presenta la reflexión total interna?

* * * * *

La luz debe ir de un medio con mayor índice de refracción a otro con menor índice de refracción. También, el ángulo de incidencia debe ser mayor que el ángulo límite.

8. El uso de lentes para convergir y divergir los rayos de luz depende del fenómeno óptico conocido como ..... El uso de espejos parabólicos y esféricos cóncavos para producir imágenes depende del fenómeno óptico llamado .....

* * * * *

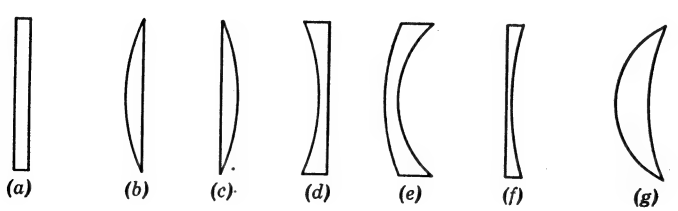
refracción
reflexión

9. Suponiendo que el medio en que se encuentra una lente divergente de vidrio sea el aire, la lente es más (gruesa/delgada) en su centro que en su borde.

* * * * *

delgada

10.



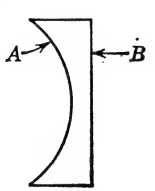
¿Qué lentes son divergentes?
¿Cuáles son convergentes?
* * * * *
(a), (e), (f)
(b), (c), (g)

11. Escriba la ecuación del fabricante de lentes para la distancia focal de una lente delgada. *(Use f, n, r_1 y r_2.)*
* * * * *

$$\frac{1}{f} = (n - 1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)$$

12. Las convenciones para los signos en esta ecuación son:
(1) Se supone que todos los rayos entran a una lente y pasan por ella de (izquierda a derecha/derecha a izquierda).
(2) Cuando tales rayos encuentran una superficie cóncava, el radio de curvatura de la superficie es (positivo/negativo).
(3) Cuando tales rayos encuentran una superficie convexa, su radio de curvatura es (positivo/negativo).
(4) Cuando tales rayos encuentran una superficie plana, la curvatura de esa superficie, $1/r$, es .... *(número).*
* * * * *
izquierda a derecha
negativo
positivo
0 ó cero
(si se equivocó en alguna respuesta, repase la Fig. 6 del panel 7)

13.



El radio de curvatura de la superficie *A* es de 10 cm. Aplicando la fórmula del fabricante a esta lente, r_1 = ... cm, y $1/r_2$ = ...
* * * * *
−10
0 ó cero.

14. Suponiendo $n = 1.5$, calcule la distancia focal de la lente descrita en el marco anterior.
* * * * *

$$\frac{1}{f} = (1.5 - 1)\left(-\frac{1}{10} - 0\right)$$

$$= (.5)\left(-\frac{1}{10}\right) = -\frac{1}{20}$$

$f = -20$ cm (no olvide el signo negativo).

15. La distancia focal negativa calculada en el marco anterior significa que se trata de una lente .....

* * * * *

divergente

16. La distancia focal de una lente delgada depende de los ..... de ..... de sus superficies refractoras y del ..... de ..... del material de que está hecha.

radios (de) curvatura
índice (de) refracción

17. Mientras más gruesa sea una lente convergente, su distancia focal será más (larga/corta).

* * * * *

corta

18. Si tiene usted dudas acerca de las respuestas a las preguntas que siguen, repase las figuras del panel 8.

La imagen que produce una lente delgada *divergente* es:

(a) real
(b) erecta
(c) invertida
(d) virtual
(e) en el mismo lado que el objeto
(f) en el lado opuesto de la lente en que está el objeto
(Escoja las respuestas que se apliquen.)

* * * * *

(b), (d), (e)

19. En $p = 2f$, la imagen que produce una lente convergente delgada está a una distancia $q =$ .... *(si es necesario repase el panel 8)*. También es(está):

(a) real
(b) virtual
(c) erecta

(d) invertida
(e) agrandada
(f) disminuida

* * * * *

$2f$; *(a), (d)*

20. A medida que un objeto se acerca al foco de una lente convergente, su imagen:

(a) se acerca a la lente
(b) se aleja de la lente
(c) se hace más grande
(d) se hace más pequeña
(e) permanece del mismo tamaño.

* * * * *

(b), (c)

21. Cuando se coloca un objeto en el foco de una lente convergente:

(a) su imagen está a $2f$
(b) su imagen está a f
(c) no hay imagen.

* * * * *

(c)

22. Se coloca un objeto de 15 cm de alto a 10 cm del centro óptico de una lente delgada; su imagen se forma a 25 cm del centro óptico, en el mismo lado de la lente en que se encuentra el objeto. Calcule:

(1) la distancia focal
(2) la altura de la imagen
(3) la clase de lente de que se trata.

* * * * *

(1) $\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{10} + \frac{1}{(-25)} = \frac{1}{10} - \frac{1}{25}$

$50 = 5f - 2f$

$3f = 50$

$f = 16.7$ cm

(2) tamaño de la imagen $= \frac{q}{p} \times$ tamaño del objeto $=$ 37.5 cm

(3) La distancia focal positiva indica que se trata de una lente convergente.

23. La luz que puede dispersarse en diferentes colores se llama ....; la que no se puede dispersar se llama .....

* * * * *

policromática
monocromática

24. La dispersión de la luz policromática depende del hecho de que los diferentes colores se propagan en los medios transparentes con (la misma rapidez/diferente rapidez), excepto en el ..... o en el .....
* * * * *
diferente rapidez
aire, vacío

PROBLEMAS

1. Si el ángulo de incidencia es de 30° y el de refracción de 15°, encuentre el índice de refracción del vidrio.

2. En vidrio de tierras raras, el índice de refracción es alto. ¿Cuál es el índice de refracción de este vidrio, si el ángulo de incidencia es de 40° y el de refracción de 19°?

3. ¿Cuál es el índice de refracción de un líquido, si el ángulo de incidencia es de 35° y el de refracción de 14°?

4. El índice de refracción del agua es 1.33. Si el ángulo de incidencia es de 30°, ¿cuál es el ángulo de refracción?

5. Si el índice de refracción de cierto vidrio es 1.5 y el ángulo de refracción de 15°, ¿cuál es el ángulo de incidencia?

6. Si se considera que la rapidez de propagación de la luz en el aire es de 3×10^8 m/seg y la luz pasa del aire al vidrio con un índice de 2, ¿cuál es la rapidez de propagación de la luz en el vidrio?

7. Si un rayo de luz pasa del aire a un líquido cuyo índice de refracción es de 2, ¿cuál es la rapidez de propagación de la luz en ese líquido?

8. ¿Cuál es la rapidez de propagación de la luz en el vidrio de tierras raras cuyo índice de refracción es 2? Suponga que la luz pasa del aire al vidrio.

9. Un rayo de luz que se propaga en vidrio crown ($n = 1.5$) a un ángulo de 49°, incide en otro medio a 41°. ¿Cuál es la rapidez de propagación de la luz en el segundo medio? ($V_{\text{aire}} = 3 \times 10^8$ m/seg.)

10. Si un rayo de luz se propaga en un medio cuyo índice de refracción es .9 incide en otro medio con un índice de 1.33, ¿cuál es el ángulo de entrada del rayo al segundo medio? $\angle r = 30°$.

11. ¿Cuál es el ángulo límite, hasta el grado entero más próximo, de un rayo de luz que pasa del agua ($n = 1.33$) al aire?

12. ¿Cuál es la distancia de la imagen de una moneda que está en el fondo de un recipiente de agua de 10 cm de profundidad? (n para el agua $= 1.33$, y suponga $n = 1$ para el aire.)

13. ¿Cuál es la distancia focal de una lente convexa (convergente) cuyo índice de refracción es de 1.5, y cuyo radio de curvatura para ambas caras es de 10 cm?

14. Si una lente convergente tiene un índice de refracción de 1.8 y sus radios de curvatura son de 8 y 10 cm, ¿cuál es su distancia focal?

15. Si los radios de curvatura de una lente cóncava son 8 cm y 4 cm, respectivamente, y su índice de refracción es 1.5, ¿cuál es la distancia focal de esta lente y qué clase de imagen forma?

16. Una lente que tiene un índice de refracción de 1.5 tiene radios de curvatura de $+10$ cm y -5 cm. ¿Cuál es su distancia focal?

17. Si la distancia focal de una lente es de 20 cm y la distancia al objeto es de 30 cm, ¿cuál es la distancia a la imagen?

18. Si para un cierto objeto la distancia de éste es de 45 cm y la de su imagen es de 30 cm, ¿cuál es la distancia focal de la lente?

19. Si se coloca un objeto a 60 cm de una lente delgada y su imagen está erecta y a 12 cm del centro óptico, ¿cuál es la distancia focal de la lente?, ¿es una lente convergente o divergente?

20. Si se coloca un objeto a 12 cm del centro óptico de una lente delgada y la imagen que produce está erecta y a 30 cm del centro óptico, ¿cuál es la distancia focal de la lente?, ¿es una lente convergente o divergente?

21. Mediante un diagrama indique cómo corregir la aberración cromática de una lente convexa de vidrio crown.

22. Explique la causa de la aberración cromática.

23. Explique la dispersión que sufre la luz blanca al pasar por un prisma en muchos colores diferentes.

CAPITULO 4

ONDAS

OBJETIVOS:

Al terminar el estudio de este capítulo el estudiante debe ser capaz de:

1. Definir las ondas y los pulsos de onda.
2. Distinguir entre ondas transversales y ondas longitudinales.
3. Definir la frecuencia, el período, la longitud de onda y la amplitud.
4. Usar la ecuación $v = f\lambda$ para calcular la frecuencia, el período y la longitud de onda y la velocidad de propagación de las ondas.
5. Describir la superposición, la interferencia constructiva y destructiva de las ondas.
6. Describir y explicar el fenómeno de las ondas estacionarias; distinguir entre ondas estacionarias y viajeras.
7. Describir la difracción de las ondas.

NOTA PRELIMINAR

El capítulo 4 puede parecerle a usted alejado de la óptica; la verdad es que hemos ido hasta donde podemos con la analogía entre los rayos de luz y los rayos geométricos, y son necesarios algunos nuevos conceptos para ampliar nuestra comprensión de los fenómenos de la luz que están más allá de aquellos, como la propagación rectilínea y la reflexión, que son fácilmente observables y considerar los que se presentan en experimentos más complicados.

También emplearemos el tema de este capítulo en el volumen final de esta serie, cuando tratemos la Física Moderna que, en ciertos contextos, nos lleva a tratar a las partículas, los electrones, por ejemplo, como si fueran ondas.

Sección 1. Definición y propiedades de una onda

1. Refirámonos al panel 10.

La letra que está en la esquina superior derecha es una ...

* * * * *

K

2. Panel 10.
Las figuras 1 y 2 representan diferentes formas de transmitir energía de *A* a *B* para hacer caer de la orilla a la bola de billar *Y*. En la Fig. 1, la bola *X* se pone en movimiento hacia *B*. Para hacer caer de la orilla a *Y*, *X* debe recorrer (todo el/parte del) trayecto de *A* a *B*.
* * * * *
todo el

3. Panel 10.
La figura 1 ilustra la transmisión de energía de una posición a otra mediante el movimiento de una partícula. La partícula (se/no se) mueve con la energía que transporta.
* * * * *
se

4. Panel 10.
En la Fig. 2, la bola *X* se pone en movimiento hacia *B* con una velocidad *V*. *X* interacciona con la hilera de bolas colocadas entre ella y *Y*, y *Y* rueda fuera de la orilla con una velocidad *V*. La energía es así transmitida de *A* a *B*, como en la Fig. 1. En la Fig. 2, *X* (recorre/no recorre) todo el trayecto de *A* a *B*.
* * * * *
no recorre

5. Panel 10.
En la Fig. 2, la energía se transmite de *A* a *B*, pero la única bola se mueve después de que *X* interacciona con la hilera de bolas de la derecha, es la bola .... La energía (se/no se) transmite después de que *X* se ha detenido.
* * * * *
Y; se

6. Panel 10.
Describimos la situación de la Fig. 2 diciendo que, después de la interacción, se mueve un *pulso de onda* de *C* a *B*. Este pulso de onda (transporta/no transporta) energía; (es/no es) tan efectivo para mover a *Y* como la bola *X* lo es en la Fig. 1.
* * * * *
transporta
es

7. Panel 10.
La figura 3 es una serie de doce ilustraciones del movimiento de un pulso de onda producido sacudiendo hacia arriba el extremo izquierdo

de una cuerda; el otro extremo de la cuerda está sujetado a un soporte fijo. El pulso se mueve de (izquierda a derecha/derecha a izquierda).
* * * * *
izquierda a derecha

8. Panel 10, Fig. 3.
Sobre la cuerda está marcado un punto *X*. Examine el comportamiento de *X* a medida que el pulso de onda se mueve a lo largo de la cuerda. En las ilustraciones 1 y 2, *X* (está subiendo/está bajando/está moviéndose en la dirección del pulso de onda/no se mueve).
* * * * *
no se mueve

9. Panel 10, Fig. 3.
En las ilustraciones 3 a 8, el punto *X* (está moviéndose en la dirección del pulso de onda/no está en movimiento/está moviéndose, pero no en dirección del pulso de onda).
* * * * *
está moviéndose, pero no en dirección del pulso de onda

10. Panel 10, Fig. 3.
El pulso de onda transporta energía de izquierda a derecha; el punto *X* se mueve únicamente (de izquierda a derecha/de arriba a abajo). Esto significa que el pulso de onda (transporta/no transporta) partículas de la cuerda a lo largo de ella.
* * * * *
de arriba a abajo
no transporta

11. Panel 10.
En general, se dice que una onda o un pulso de onda viaja a través de un medio sin transportar el medio consigo. En la Fig. 2, el medio es la hilera de bolas de billar *a* a *f*; en la Fig. 3, el medio es la ..... a lo largo de la cual se mueve la onda.
* * * * *
cuerda

12. Panel 10.
La figura 3 muestra aquellas partes de un medio que (a veces/nunca) son desplazadas por un pulso de onda. Un pulso de onda (transporta/no transporta) su medio consigo.
* * * * *
a veces (*X* se desplaza hacia arriba y hacia abajo)
no transporta

13. Un trozo de corcho flota en la superficie de un estanque; a corta distancia se deja caer una piedrecita en el estanque; esto produce un ..... de ..... que se irradia hacia afuera en forma circular.

* * * * *

pulso (de) onda

14. A medida que el pulso de onda pasa bajo el corcho, éste:

(a) no se mueve en lo absoluto, es decir, queda como estaba.

(b) es llevado consigo por el pulso, hasta la orilla del estanque.

(c) sube y baja en la superficie.

Escoja una respuesta.

* * * * *

(c)

15. En muchas formas se puede iniciar un pulso de onda a través de un medio. En este caso particular perturbamos el agua de un estanque .... *(complete).*

* * * * *

dejando caer una piedra al agua

16. Panel 10.

En la Fig. 2, ¿cómo iniciamos el pulso de onda a través de las bolas *a* a *f*?

* * * * *

Permitimos que la bola en movimiento *X* interaccionara con ellas

17. Panel 10.

En la Fig. 3 sacudimos hacia arriba el extremo libre de la cuerda. Esta es la ..... que produce en el medio un ..... de .....

* * * * *

perturbación (deformación)
pulso (de) onda

18. Panel 10. Examine la Fig. 4.

En esta figura la onda es producida por un movimiento *periódico* hacia arriba y hacia abajo en el extremo libre de la cuerda de la Fig. 3. Las perturbaciones que producen esta corriente de pulsos de onda deben ocurrir en intervalos de tiempo (iguales/desiguales).

* * * * *

iguales

19. Panel 10.

La onda de la Fig. 4 es producida por un movimiento armónico simple

hacia arriba y abajo en la fuente. El movimiento armónico simple es una forma de movimiento ..... Las ondas producidas se mueven (hacia arriba y abajo/de izquierda a derecha). El medio se mueve (hacia arriba y abajo/de izquierda a derecha).

* * * * *

periódico
de izquierda a derecha
hacia arriba y abajo

Sección 2. Ondas transversales y longitudinales

1. Panel 10.

En la Fig. 4, el movimiento armónico simple que produce la onda, es (paralelo/perpendicular) al movimiento de la onda a lo largo de la cuerda.

* * * * *

perpendicular

2. Panel 10, Fig. 4.

Esto significa que las partículas del medio se desplazan a ángulos ..... con el movimiento de la onda a lo largo del medio.

* * * * *

rectos

3. En una onda *transversal* (o pulso de onda) las partículas del medio se desplazan normalmente a la dirección en que se mueve la onda en sí. La Fig. 3 del panel 10 (es/no es) un ejemplo de pulso transversal de onda.

* * * * *

es

4. Panel 10.

La figura 2 (es/no es) un ejemplo de pulso transversal de onda.

* * * * *

no es

5. Un pulso de onda en el que el medio se desplaza normalmente al movimiento de la onda es un pulso ..... de onda.

* * * * *

transversal

6. Panel 10. Refiérase a la Fig. 5.

El medio (un resorte en espiral) se perturba comprimiendo algunas espiras en el extremo izquierdo. En seguida se liberan estas espiras y la compresión pasa a través del medio, como un ..... de ..... En este caso la perturbación (es/no es) perpendicular al movimiento de la onda.

* * * * *

pulso (de) onda
no es

7. Panel 10, Fig. 5.

El paso de la compresión a través del resorte en espiral (es/no es) un movimiento transversal de ondas.

* * * * *

no es

8. Panel 10, Fig. 5.

Se dice que el desplazamiento de cualquier espira en particular, a medida que la onda pasa por ella, es *paralelo* al de la propagación de la onda. A este impulso de onda se le llama *longitudinal.* Las ondas sonoras desplazan moléculas de aire paralelamente a la dirección de propagación de la onda. Las ondas sonoras son (transversales/longitudinales).

* * * * *

longitudinales

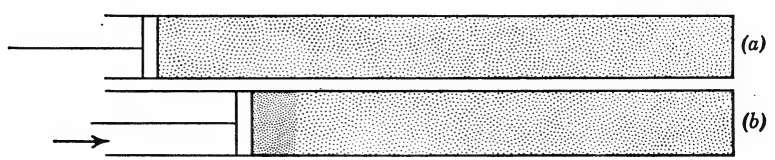
9. Panel 10.

La figura 2 ilustra un movimiento de ondas (longitudinales/transversales), porque el movimiento de *X* es ..... al movimiento del pulso de onda que lo produce.

* * * * *

longitudinales
paralelo

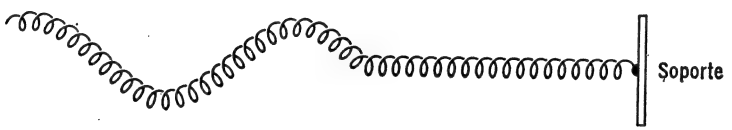
10..



El aire de *(a)* se comprime súbitamente en *(b)*. La compresión desa-

rrollada en el extremo izquierdo de *(b)* pasa en seguida a través del cilindro. Este es un ejemplo de pulso de onda .....
* * * * *
longitudinal

11.



El extremo libre de este resorte en espiral se sacude *hacia arriba y abajo.* La onda producida es .....
* * * * *
transversal

12. El que una onda sea longitudinal o transversal depende de:
(a) la dirección en que se perturbe el medio
(b) la naturaleza del medio en sí.
[Escoja *(a)* o *(b)*].
* * * * *
(a)

13. En el movimiento de ondas longitudinales, el desplazamiento de una partícula del medio es ..... al movimiento de la onda. En el movimiento transversal, el desplazamiento de una partícula del medio es ..... al movimiento de la onda.
* * * * *
paralelo
perpendicular

Sección 3. Propiedades de las ondas: Frecuencia, período, longitud de onda, rapidez, amplitud
$v = f\lambda$

1. Refirámonos al panel 11.
La letra en la esquina superior derecha es una .....
* * * * *
G

2. Panel 11.
La figura 1 es un tren de ondas que se mueve a lo largo de una

cuerda sujeta a un soporte fijo que está a la derecha, producido por una perturbación periódica proveniente de una fuente a la izquierda. Si la fuente mueve la cuerda hacia arriba y abajo en movimiento armónico simple f veces por segundo, un observador de pie que esté a la derecha de la fuente verá que pasan .. ondas por segundo.

* * * * *

f

3. Panel 11.

El número de pulsos de onda que pasan por un punto dado de un medio es una propiedad importante de las ondas que se llama *frecuencia.* Cada movimiento de la fuente hacia arriba y abajo es *un ciclo.* Si la fuente se mueve hacia arriba y abajo 5 veces por segundo, la frecuencia de la onda producida es de 5 ..... por .....

* * * * *

ciclos
segundo

4. La frecuencia (f) de una onda es igual al número de ciclos en 1 segundo.

$$\text{frecuencia de una onda} = \frac{1 \text{ seg}}{\text{tiempo empleado para } \ldots\ldots\ldots\ldots \textit{(complete).}}$$

* * * * *

realizar un movimiento hacia arriba y abajo, 1 ciclo.

5. $$\text{Frecuencia de la onda} = (f) = \frac{1 \text{ seg}}{\text{tiempo para 1 ciclo}}$$

Período (T) de la onda = tiempo para 1 ciclo.
Usando símbolos podemos relacionar la frecuencia de la onda con su período, como sigue:

$$f = \frac{\quad\cdot\quad}{\quad\cdot\quad}$$

* * * * *

$$\frac{1 \text{ s}}{T}$$

6. T = período de la onda = ... que emplea una onda en efectuar un .....

f = número de .....s que efectúa la onda en .... segundo(s).

* * * * *

tiempo
ciclo

ciclo(s)
1 ó uno

7. Panel 11, Fig. 1.
La distancia en línea recta del punto *a* al punto *b* se llama *longitud de onda;* es la distancia que recorre la ..... durante un .....
* * * * *
onda
ciclo

8. La longitud de onda es una medida de (tiempo/distancia)
El período de una onda es una medida de (tiempo/distancia)
La frecuencia de una onda es una medida de (tiempo/distancia/número de ciclos en una unidad de tiempo).
* * * * *
distancia
tiempo
número de ciclos en una unidad de tiempo.

9. La longitud de onda es la distancia en línea (recta/curva) que recorre una onda durante el intervalo de *tiempo* de un ..... de onda.
* * * * *
recta
período *(no* ciclo, puesto que un ciclo no es un intervalo de tiempo).

10. Panel 11.
También podemos definir la longitud de onda como la distancia más corta entre dos puntos en dos ciclos consecutivos que están en la misma fase (es decir, con el mismo desplazamiento relativo y el mismo movimiento relativo, hacia arriba o hacia abajo). En la Fig. 1, la línea *cd* (es/no es) una longitud de onda.
* * * * *
es

11. Panel 11, Fig. 1.
La distancia *cg* (es/no es) una longitud de onda, porque los puntos *c* y *g* (están/no están) en ciclos de onda consecutivos.
* * * * *
no es
no están

12. Panel 11, Fig. 1.
Los puntos *d* y *g* (están/no están) en ciclos consecutivos. En *d* el medio se está desplazando hacia (arriba/abajo); en *g* el medio se está

desplazando hacia (arriba/abajo). Los puntos *d* y *g* (están/no están) en fase. La distancia *dg* (es/no es) una longitud de onda.

* * * * *

están
abajo
arriba
no están
no es

13. Panel 11, Fig. 1.

¿Cuál(es) de las siguientes distancias en línea recta es(son) longitudes de onda?

ab	*bf*	*hk*
cd	*pm*	*dg*

* * * * *

ab; *cd*; *hk*

14. Ahora queremos relacionar a la longitud de onda con cantidades como frecuencia de onda y período de onda. Sea v la rapidez con que viaja una onda a través de un medio, y sea la letra griega lambda (λ) su longitud de onda. λ representa la ..... que recorre una onda en un intervalo de ..... de un período (T).

* * * * *

distancia
tiempo

15. En general,

(distancia) = (rapidez) · (tiempo).

Para una onda, ... = ... · .....

(Use los símbolos v, λ y T.)

* * * * *

$\lambda = v \cdot T$

16. Para cualquier movimiento ondulatorio, $\lambda = vT$.

Despejando v: $v =$ .....

* * * * *

$$\frac{\lambda}{T}$$

17. $v = \dfrac{\lambda}{T}$ se puede escribir así: $v = \dfrac{1}{\quad}\cdot$ .....

* * * * *

$$v = \frac{1}{T} \cdot \lambda$$

18. Establezcamos una relación matemática entre v, f y λ.

(1) $v = \frac{1}{T} : \lambda$

(2) f y T se pueden relacionar con la ecuación $f =$ .....

(3) Substituimos $\frac{1}{T}$ en (1) con el miembro izquierdo de (2) y obtenemos: $v =$ .....

* * * * *

$\frac{1}{T}$; $f\lambda$

19. $v = f\lambda$

Esta ecuación relaciona la rapidez de propagación de una ..... con su ..... de ..... y su .....

* * * * *

onda
longitud (de) onda
frecuencia

20. Panel 11, Fig. 1.

La fuente está en movimiento armónico simple, a 10 cps (ciclos por segundo). La distancia medida *ab* es de 30 cm. Calcule la rapidez con que se mueven las ondas a lo largo de la cuerda.

$$v = f\lambda = \frac{10 \text{ ciclos}}{\text{seg}} (30 \text{ cm}) = 300 \text{ cm/seg}$$

21. Una onda tiene un período de 1/10 seg; calcule su frecuencia en ciclos por segundo.

* * * * *

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{1/10} = 10 \text{ ciclos/seg}$$

22. Bajo la influencia de una corriente continua de ondas de agua, un corcho sube y baja en la superficie de un estanque 4 veces por seg. La rapidez media de una sola onda es de 1 m/seg.

$f =$ ..... cps
$v =$ ..... m/seg
$\lambda =$ ..... m.

* * * * *

4
1
$v = f\lambda$

$1 = 4\lambda$
$\lambda = \frac{1}{4}$ ó .025 m

23. Panel 11, Fig. 1.

Otra medida que nos es útil al tratar de ondas es el desplazamiento máximo de una partícula en el medio desde su *posición original* en reposo. A este desplazamiento se le llama *amplitud* de la onda. La distancia (*pm/bf/dg*) es una medida de la amplitud de esta onda.

* * * * *

bf

24. La amplitud de un pulso de onda es el ..... de una partícula del medio, desde su posición en equilibrio. Es una medida de (tiempo/longitud/frecuencia).

* * * * *

desplazamiento máximo
longitud

25. La distancia máxima que se desplaza una partícula en un medio, debido al movimiento de las ondas a través de él, en un período de onda, se llama ..... de la onda.

* * * * *

amplitud

26. La distancia que recorre un pulso de onda durante un período se llama (frecuencia/longitud de onda/amplitud) de la onda. La distancia máxima que se desplaza una partícula en un medio, debido a las ondas en movimiento en el medio, se llama (frecuencia/longitud de onda/amplitud) de la onda.

* * * * *

longitud de onda
amplitud

Sección 4. Superposición de ondas

1. Panel 11. Refirámonos a la Fig. 2.

Esta es una serie de ilustraciones de los pulsos de onda que se propagan en una cuerda. En la primera ilustración vemos que el pulso de onda *A* se mueve de (derecha a izquierda/izquierda a derecha) y el pulso *B* se mueve de (derecha a izquierda/izquierda a derecha). *A* y *B* tienen (la misma forma/diferente forma).

* * * * *

izquierda a derecha
derecha a izquierda
diferente forma

2. Panel 11, Fig. 2.
En todas las ilustraciones está marcado el mismo punto *X* en la cuerda. A medida que los dos impulsos se cruzan, el punto *X* de la cuerda (se/no se) desplaza.
* * * * *
se

3. Panel 11, Fig. 2.
Cuando dos ondas en movimiento interaccionan en el mismo medio, el resultado que se observa se llama *interferencia.* En las ilustraciones 1 y 7, los pulsos de onda *A* y *B* (están/no están) interfiriéndose; en las ilustraciones 2 a 5, los pulsos de onda *A* y *B* (están/no están) interfiriéndose.
* * * * *
no están
están

4. Panel 11, Fig. 2.
En las ilustraciones 2 a 5, las líneas de trazos indican la forma de *A* y de *B* cuando no se están interfiriendo. Las porciones sombreadas son las áreas donde está ocurriendo la ..... de *A* y *B.*
* * * * *
interferencia

5. Panel 11, Fig. 2.
Examine el desplazamiento de *X* en las ilustraciones 2 a 5. Cuando los pulsos *A* y *B* están interfiriendo, el desplazamiento real de *X* es la (suma/diferencia) de los desplazamientos que habrían producido *A* y *B* separadamente.
* * * * *
suma

6. Panel 11, Fig. 2.
En la ilustración 6, el desplazamiento de *X* es el producido por (*A* solamente/*B* solamente/*A* y *B* juntos). Esto se debe a que (hay/no hay) interferencia en la ilustración, entre *A* y *B.*
* * * * *
B solamente
no hay

7. Siempre que interfieren dos (o más) pulsos de onda, el desplazamiento total de cualquier punto del medio es la ..... de los desplazamientos individuales de cada pulso. Esto se conoce como principio de *superposición.* Esta ley (se/no se) aplica a la ilustración 5 de la Fig. 2 del panel 11; (se/no se) aplica a la ilustración 7.

* * * * *

suma
se
no se

8. Cuando dos pulsos de onda interaccionan en un mismo medio, el resultado que se observa se llama ..... y el desplazamiento total de un punto del medio mientras las ondas están interaccionando, se explica mediante el principio de .....

* * * * *

interferencia
superposición

9. Panel 11, Fig. 2.

Después de que los pulsos *A* y *B* han interferido, el *A* se mueve de (derecha a izquierda/izquierda a derecha), y el *B* se mueve de (derecha a izquierda/izquierda a derecha). En efecto, la dirección del movimiento y la forma de los pulsos (cambian/no cambian) con la interferencia.

* * * * *

izquierda a derecha
derecha a izquierda
no cambian

10. Cuando dos o más pulsos de onda se están cruzando, la deformación que se observa en el medio es la suma de los ..... producidos independientemente por cada pulso. Esto se conoce como el principio de ..... La interferencia (cambia/no cambia) la dirección en que se mueve un pulso de onda en el medio. Después de la interferencia, un pulso de onda tiene (su forma anterior/diferente forma).

* * * * *

desplazamientos
superposición
no cambia
su forma anterior

11. Refirámonos al panel 12.

La letra que está en la esquina superior derecha es una .....

* * * * *

H

12. Panel 12. Vea la Fig. 1.

Esta es una serie de ilustraciones de dos pulsos de onda interfiriéndose en un mismo medio. Estos pulsos tienen (la misma/diferente) forma; se mueven en (la misma dirección/direcciones opuestas).

* * * * *

la misma
direcciones opuestas

13. Panel 12, Fig. 1.

Los dos pulsos producen desplazamientos del medio en (la misma dirección/direcciones opuestas).

* * * * *

la misma dirección

14. Panel 12, Fig. 1.

En la ilustración *(b)*, los pulsos de onda están (parcialmente/completamente) superpuestos.

* * * * *

parcialmente

15. Panel 12, Fig. 1.

En la ilustración *(b)*, el desplazamiento de X es la ..... de los desplazamientos producidos independientemente por cada onda.

* * * * *

suma

16. Panel 12, Fig. 1.

En la ilustración *(c)*, los dos pulsos de onda interfieren (parcialmente/completamente). El desplazamiento de X es ..... veces el que tendría con cada pulso de onda independiente.

* * * * *

completamente
dos

17. Panel 12, Fig. 1.

Cuando dos ondas están completamente superpuestas y el desplazamiento resultante es mayor que el que produce cada onda por sí sola, el efecto se llama interferencia *constructiva.* La ilustración *(b)* (es/no es) un ejemplo de interferencia constructiva.

* * * * *

no es

18. Panel 12, Fig. 1.

La ilustración *(d)* es un ejemplo de interferencia parcial; la ilustración *(c)* muestra la interferencia .....

* * * * *

constructiva

19. Panel 12. Vea la Fig. 2.

En este caso los pulsos tienen (la misma/diferente) forma; están moviéndose en (la misma dirección/direcciones opuestas). Producen desplazamientos del medio en (la misma dirección/direcciones opuestas).

* * * * *

la misma
direcciones opuestas
direcciones opuestas

20. Panel 12, Fig. 2.

Examine las ilustraciones *(a)* a *(e)*. ¿En qué ilustración están completamente superpuestas las dos ondas?

(c)

21. Panel 12, Fig. 2.

En *(c)*, el efecto total que se observa en estos dos pulsos es (un desplazamiento/que no hay desplazamiento) del medio.

* * * * *

que no hay desplazamiento

22. Panel 12.

Siempre que se superponen dos ondas en tal forma que el efecto total que se observa es que no hay desplazamiento del medio en absoluto, se dice que hay interferencia *destructiva.* La ilustración *(b)* de la Fig. 2, (es/no es) un ejemplo de interferencia destructiva.

* * * * *

no es

23. Panel 12.

La ilustración *(c)* de la Fig. 1 es un ejemplo de interferencia .... La ilustración *(c)* de la Fig. 2 es un ejemplo de interferencia .....

* * * * *

constructiva
destructiva

24. Panel 12, Fig. 2.

Examine las ilustraciones *(d)* y *(e)*. Después de la interferencia destructiva,

(1) las ondas originales dejan de existir.
(2) las ondas originales siguen existiendo, pero sus formas cambian.
(3) las ondas originales existen y se mueven en la misma dirección en que lo hacían antes de interferir destructivamente.
(4) las ondas originales existen aún, pero su dirección ha cambiado.

* * * * *

(3)

25. Las interferencias constructiva y destructiva son el resultado de la ..... de una onda con otra en el mismo medio.

* * * * *

superposición.

26. Cuando dos o más ondas en movimiento en el mismo medio se superponen, la deformación resultante del medio puede ser muy complicada. Sin embargo, la posición de cualquier punto del medio se puede encontrar .....ando los ..... que producen en ese punto cada onda por separado.

* * * * *

sum(ando)
desplazamientos

Sección 5. Reflexión de ondas

El objeto inmediato de esta sección es demostrar que las ondas en general y los rayos de luz son similares, a causa de que ambos pueden ser reflejados y refractados. La sección 6 cubre material interesante e importante en nuestra consideración de la física general de las ondas; el concepto de ondas confinadas será útil cuando consideremos la física cuántica y la teoría ondulatoria de la materia en el volumen cuatro de esta serie. Puede omitirse por ahora sin pérdida de continuidad.

La sección 7 introduce un fenómeno ondulatorio que aún no hemos observado en óptica: la difracción, que es la desviación que sufren las ondas en el borde de los obstáculos, y su paso a través de aberturas en barreras. En el capítulo 5 examinaremos la teoría ondulatoria de la luz. Una prueba crucial de esta teoría es el poder observar si la luz sufre o no la difracción.

1. Panel 12.

La figura 3 muestra una serie de ilustraciones de un pulso que se dirige hacia un soporte fijo o barrera. El pulso original, es decir, antes

de llegar a la barrera, se llama onda *incidente.* En este caso la onda incidente produce un desplazamiento hacia (arriba/abajo) del estado de equilibrio del medio, y se mueve de (derecha a izquierda/izquierda a derecha).

* * * * *

arriba
izquierda a derecha

2. Panel 12, Fig. 3.

La onda que resulta cuando la onda incidente interacciona con la barrera se llama onda *reflejada.* En esta figura, la onda reflejada se muestra en las ilustraciones ...., ... y .....

* * * * *

(d), (e) y *(f)*

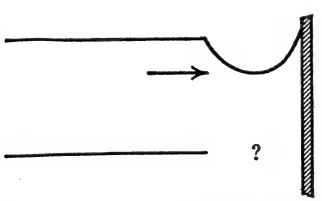
3. Panel 12, Fig. 3.

El pulso reflejado produce un desplazamiento hacia (arriba/abajo) del estado de equilibrio del medio, y se mueve de (derecha a izquierda/izquierda a derecha).

* * * * *

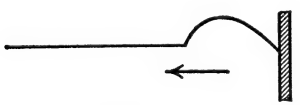
abajo
derecha a izquierda

4.

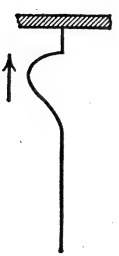


Complete la ilustración de la onda reflejada; use una flecha para indicar su dirección.

* * * * *

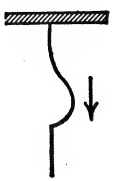


5.



Este es un pulso incidente. Dibuje su reflexión.

* * * * *



6. Cuando un pulso incide en algún soporte fijo o barrera, el desplazamiento producido por el pulso reflejado (permanece igual/se invierte) respecto al estado de equilibrio del medio. La onda incidente y la reflejada se mueven en (la misma dirección/direcciones opuestas).

* * * * *

se invierte
direcciones opuestas

7. Panel 12. Vea la Fig. 4.

Esta figura indica lo que sucede cuando un pulso que se mueve en un medio encuentra otro más denso. En este caso, una onda incidente de longitud l_1 y amplitud α_1 incide en la unión con una cuerda más (pesada/ligera).

pesada

8. Panel 12, Fig. 4.

La onda incidente se mueve en la cuerda ....., de (izquierda a derecha/derecha a izquierda).

* * * * *

ligera
izquierda a derecha

9. Panel 12, Fig. 4.

Cuando la onda incidente llega a la unión de las dos cuerdas,

(1) se transmite enteramente a la cuerda gruesa.
(2) se refleja enteramente en la unión.
(3) parte se refleja y parte se transmite.

* * * * *

(3)

10. Panel 12, Fig. 4.

La onda reflejada (tiene la misma longitud de/es más larga que/es

más corta que) la onda incidente. La onda reflejada tiene (la misma/mayor/menor) amplitud.

* * * * *

tiene la misma longitud de
menor

11. Panel 12, Fig. 4.

La onda reflejada se mueve en el (mismo lado/lado opuesto) de la cuerda respecto a la onda incidente, y en la (misma dirección/dirección opuesta).

* * * * *

mismo lado
dirección opuesta.

12. Panel 12, Fig. 4.

A aquella parte de la onda incidente que *no* se refleja, pero que continúa en el medio más denso, se le llama *onda transmitida.* La onda transmitida y la onda incidente se mueven en (la misma dirección/direcciones opuestas) y en (el mismo lado/lados opuestos) de sus medios.

* * * * *

la misma dirección
el mismo lado

13. Cuando una onda incidente encuentra una barrera fija, (toda/parte de) ella se refleja; cuando encuentra un medio más denso, (toda/parte de) ella se refleja.

* * * * *

toda
parte de

14. Considere una barrera fija como si fuera un medio muy denso; entonces, a medida que la densidad del segundo medio aumenta, la cantidad de onda incidente que se refleja (aumenta/disminuye) y la cantidad transmitida (aumenta/disminuye).

* * * * *

aumenta
disminuye

Sección 6. Ondas viajeras. Nodos y antinodos producidos por ciertas ondas que interfieren. Ondas estacionarias

$$L = \frac{n\lambda}{2}$$

1. Refirámonos al panel 13.
La letra en la esquina superior derecha es una ...
* * * * *
Q

2. Panel 13. Vea la Fig. 1.
Esta es una serie de dibujos de una corriente de ondas en una cuerda sujeta a un soporte fijo que está en algún lugar a la derecha. Las ilustraciones corresponden a la misma sección de cuerda, a instantes sucesivos a medida que la onda la recorre. Los puntos *N* son puntos de la cuerda que en ese instante (están/no están) desplazados de su posición de equilibrio.
* * * * *
no están

3. Panel 13, Fig. 1.
Los puntos *M* son puntos del medio que en el instante dado están sufriendo un desplazamiento (máximo/cero).
* * * * *
máximo

4. Panel 13, Fig. 1.
La corriente de ondas se mueve de (derecha a izquierda/izquierda a derecha). Al observar el movimiento de la onda de t_1 a t_5, vemos que los puntos del medio de desplazamiento cero se mueven de (izquierda a derecha/derecha a izquierda/arriba abajo).
* * * * *
izquierda a derecha; izquierda a derecha

5. Panel 13, Fig. 1.
A medida que el tiempo cambia de t_1 a t_5, los puntos de máximo desplazamiento (se/no se) mueven. A medida que vamos de t_1 a t_5, la amplitud de la onda (cambia/permanece igual).
* * * * *
se; permanece igual

6. Una onda en la que los puntos de desplazamiento máximo y cero cambian de un instante a otro se llama *viajera.* La Fig. 1 (es/no es) un ejemplo de onda viajera.

* * * * *

es

7. Panel 13. Refiérase a la Fig. 2.

Esta es una serie de ilustraciones de la deformación que se produce en un alambre, sujeto entre dos soportes fijos, al pulsarla. Las ilustraciones muestran el desplazamiento del alambre en los instantes sucesivos t_1 a t_5. Se puede demostrar que cada una de las figuras es el resultado de la interferencia de las ondas que se reflejan de uno a otro soporte. En t_3, (hay/no hay) desplazamiento del medio en lo absoluto. Esto tiene que deberse a la interferencia ..... de las ondas reflejadas.

* * * * *

no hay
destructiva

8. Panel 13, Fig. 2.

Los puntos *N* son aquellos en los que el desplazamiento del medio (es máximo/es cero/está entre cero y el máximo).

* * * * *

es cero

9. Panel 13, Fig. 2.

En los tiempos sucesivos t_1 a t_5, los puntos del medio que no se desplazan (se/no se) mueven. La figura 2 (es/no es) un ejemplo de onda viajera.

* * * * *

no se
no es

10. Panel 13, Fig. 2.

Observe también que en los tiempos sucesivos t_1 a t_5 la amplitud de la onda (cambia/permanece igual).

cambia

11. Panel 13.

En la Fig. 1, escoja una respuesta:

(1) Los puntos de desplazamiento cero siempre son los mismos.

(2) Para instantes sucesivos, los puntos de desplazamiento cero son diferentes.

* * * * *

(2)

12. Panel 13.

En la Fig. 2, escoja una respuesta:

(1) Los puntos de desplazamiento cero siempre son los mismos.

(2) En instantes sucesivos, los puntos de desplazamiento cero no son los mismos.

* * * * *

(1)

13. Panel 13, Fig. 2.

Puesto que entre un instante y otro los puntos *N* no se mueven, la perturbación que se produce aquí (se/no se) mueve horizontalmente.

* * * * *

no se

14. Panel13, Fig. 2.

Aquí el único movimiento es de (izquierda a derecha/derecha a izquierda/arriba hacia abajo), porque el desplazamiento máximo del alambre (cambia/permanece igual) de un instante a otro.

* * * * *

arriba hacia abajo
cambia

15. Panel 13.

El fenómeno ilustrado en la Fig. 2 se llama onda estacionaria. Esta onda es el resultado de la ..... de las ondas que se reflejan entre una y otra de las barreras fijas. Una onda estacionaria (se/no se) mueve entre las barreras.

* * * * *

interferencia
no se

16. Panel 13.

Es característica de las ondas estacionarias el que ciertos puntos, llamados *nodos,* siempre estén en reposo. Los puntos *N* de la Fig. 1 (son/no son) nodos; los *N* de la Fig. 2 (son/no son) nodos.

* * * * *

no son
son

17. Un medio con puntos siempre en reposo es una característica de las ondas (viajeras/estacionarias). Tales puntos se llaman .....
* * * * *
estacionarias
nodos

18. Panel 13.
La Fig. 3 es una onda estacionaria que se produce en un alambre tenso al darle un tirón en el centro; la ilustración es un compuesto de vibraciones hacia arriba y abajo. Los nodos de esta onda estacionaria están en los puntos (*A/B/C/D*).
* * * * *
A, C

19. Panel 13.
La Fig. 4 es una ilustración de un alambre entre dos soportes fijos vibrando en dos secciones. Los nodos de esta onda estacionaria están en (*A/B/C/D/E/F*).
* * * * *
A, C, E

20. Panel 13.
A la mitad de la distancia entre dos nodos consecutivos está el punto de ..... desplazamiento, cuyo nombre es antinodo. El nodo es un punto de ..... desplazamiento.
* * * * *
máximo
cero

21. Panel 13.
Los antinodos de la Fig. 3 están en los puntos ..... *(use símbolos)*. Los antinodos de la Fig. 4 están en los puntos ..... *(use símbolos)*.
* * * * *
B, D
B, E, D, F

22. Panel 13, Fig. 2.
La existencia de una onda estacionaria depende de la interferencia ..... en los nodos.
* * * * *
destructiva

23. Panel 13.

La distancia entre nodos consecutivos de una onda estacionaria se relaciona con la longitud de onda de las ondas viajeras que interfieren para producirla. En la Fig. 2, la distancia entre nodos consecutivos es ..... de la longitud de onda.

* * * * *

un medio ó 1/2

24. Panel 13.

En la Fig. 3, la longitud de onda de la onda estacionaria es de 10 cm. La distancia entre sus nodos es de ..... cm.

* * * * *

$$\frac{\lambda}{2} = \frac{10\text{ cm}}{2}$$

25. Panel 13.

En la Fig. 4, la longitud de la onda estacionaria es de 1 metro. La distancia entre A y C es de ..... m; la distancia entre C y E es de ..... m.

* * * * *

A y C son nodos consecutivos:

$$AC = \frac{\lambda}{2} = \tfrac{1}{2}\text{ m} = 0.5\text{ m}$$

C y E también son nodos consecutivos:

$$CE = \frac{\lambda}{2} = \tfrac{1}{2}\text{ m} = 0.5\text{ m}$$

26. Panel 13, Fig. 3.

Sean: λ = longitud de la onda estacionaria, y L = longitud (AC) del medio que mantiene la onda estacionaria.

$$L = \frac{\lambda}{\ldots\ldots\ (número)}$$

* * * * *

$$L = \frac{\lambda}{2}$$

27. Panel 13.

En la Fig. 4, sean: λ = longitud de la onda, y L = longitud (AE) del medio.

$L = \ldots\ldots \cdot \frac{\lambda}{2}$ *(número)*

* * * * *

2

28. Panel 13.

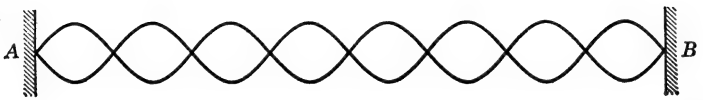
En la Fig. 2, sean: λ = longitud de la onda estacionaria, y L = longitud del medio.

$L = \ldots\ldots \cdot \frac{\lambda}{2}$ *(número)*

* * * * *

3

29.



Esta figura representa una onda estacionaria. Su longitud de onda es λ. La longitud (AB) del medio es L.

$L = \ldots\ldots \cdot \frac{\lambda}{2}$ *(número)*

* * * * *

8

30. En general, $L = n\frac{\lambda}{2}$; donde n debe ser (un número fraccionario/un número entero).

* * * * *

un número entero

31. Panel 13.

En la Fig. 2, sea $L = 12$ metros

$n = \ldots\ldots$

$\lambda = \ldots\ldots$ m

* * * * *

3

$L = n\frac{\lambda}{2}$

$12 \text{ m} = 3\frac{\lambda}{2}$

$\lambda = {}^{24}/_{3} \text{ m} = 8 \text{ m}$

32. Panel 13.

En la Fig. 3, si $L = 10$ cm, calcule λ.

* * * * *

$$L = n\frac{\lambda}{2}$$

$$10\text{ cm} = \frac{\lambda}{2} \quad (n = 1 \text{ en la Fig. 3})$$

$$\lambda = 20\text{ cm}$$

33. $L = n\frac{\lambda}{2}$

Esta ecuación relaciona la ..... de ..... de una onda ..... con la ..... del medio donde está confinada. n debe ser un ....

* * * * *

longitud (de) onda
estacionaria
longitud
número entero

34. Se une un alambre a dos soportes fijos que están a 25 cm de distancia. El problema es si se puede mantener en él una onda estacionaria de 3 cm de largo.

$L =$ ..... cm

$\lambda =$ ..... cm

Calcule n.

¿Es posible mantener en este alambre una onda estacionaria de 3 cm? Explique por qué.

* * * * *

25
3

$$L = n\frac{\lambda}{2}$$

$25 = 3/2\, n$
$n = 50/3$
¡No!, porque n *no es* número entero.

35. Una onda estacionaria describe un medio vibrando como un todo, con ciertos puntos de cero desplazamiento que se llaman ....., los cuales (cambian/permanecen iguales) de un instante a otro. Tal onda

resulta de la ..... de las ondas reflejadas en los extremos fijos del medio.

* * * * *

nodos
permanecen iguales
interferencia

36. Una condición para que exista una onda estacionaria es que la distancia (d) entre dos nodos consecutivos esté relacionada con la longitud de onda (λ) de la onda, mediante la ecuación: $d =$ .....

Otra condición es que el medio tenga una longitud (L) relacionada con la longitud de onda λ mediante la ecuación: $L =$ ....., donde n es un .... *(complete).*

* * * * *

$\frac{\lambda}{2}$

$\frac{n\lambda}{2}$

número entero

Sección 7. Ondas en el agua; difracción

1. Refirámonos al panel 14.

La letra en la esquina superior derecha es una ...

* * * * *

F

2. Panel 14.

La Fig. 1 es una ilustración de ondas en el agua vistas lateralmente. Los puntos altos de las ondas se llaman (crestas/seno); los puntos bajos se llaman .....

* * * * *

crestas
senos

3. Panel 14.

La Fig. 2 es un dibujo de un tanque de ondas, o sea un recipiente con fondo de vidrio, llenado parcialmente con agua. Se envía una corriente de ondas a través del agua. La luz que está encima del tanque pasa a través del agua a la pantalla colocada bajo el tanque. Observe

las formas de las crestas y los senos respecto a la luz incidente. Las crestas actúan como lentes (divergentes/convergentes).
* * * * *
convergentes

4. Panel 14, Fig. 2.
Debido a que las crestas actúan como lentes convergentes, en la pantalla bajo el tanque aparecen como franjas (brillantes/obscuras).
* * * * *
brillantes

5. Panel 14.
La figura 3 es una fotografía de la pantalla de un tanque de ondas. Las franjas obscuras entre franjas brillantes corresponden a (las crestas/los senos) en las ondas del agua.
* * * * *
los senos.

6. Panel 14.
En la Fig. 1, la distancia mínima entre cualquiera de las dos crestas consecutivas mide una propiedad física importante de cualquier onda, a saber, su ..... de .....
* * * * *
longitud (de) onda

7. Panel 14.
En la Fig. 3, la distancia entre una franja brillante y la franja obscura adyacente (es/no es) una medida de la longitud de onda.
* * * * *
no es

8. Panel 3, Fig. 4.
Para medir la longitud de las ondas que se producen en un tanque de ondas, medimos la distancia entre bandas brillantes ..... en la pantalla. Esta distancia es directamente proporcional a la que hay entre .... de las ondas en sí.
* * * * *
consecutivas
crestas consecutivas

9. Panel 14.
Las ondas ilustradas en la Fig. 3 son rectas; la dirección en que se mueven es (paralela/perpendicular) a las ondas en sí.
* * * * *
perpendicular

10. Panel 14.

La figura 4 es una fotografía de las ondas de agua circulares en un tanque de ondas. Las franjas brillantes indican la situación de las .... de las ondas. La distancia entre franjas brillantes consecutivas es una medida de la ..... de ....., de la onda que se está fotografiando.

* * * * *

crestas
longitud (de) onda

11. Refirámonos al panel 15.

La letra en la esquina superior derecha es una ...

* * * * *

L

12. Panel 15.

Usaremos líneas rectas paralelas para indicar las crestas de pulsos rectos. Una flecha indicará la dirección en que se propagan los pulsos. En la Fig. 1, el grupo de ondas I está moviéndose hacia (arriba/abajo/ la derecha/la izquierda). El grupo de ondas II está moviéndose hacia (arriba/abajo/la derecha/la izquierda).

* * * * *

la derecha
arriba

13. Panel 15, Fig. 1.

Las distancias (*AD*/*BD*/*AC*/*BC*/*AB*) representan la longitud de onda de esta onda.

* * * * *

BC, AB

14. Panel 15, Fig. 1.

El grupo de ondas II tiene una longitud de onda más (larga/corta) que la del grupo I.

* * * * *

corta

15. Panel 15, Fig. 1.

Los grupos de ondas I y II se mueven (paralelamente/perpendicularmente/en direcciones opuestas).

* * * * *

perpendicularmente

16. Panel 15.

La Fig. 2 es una fotografía de las ondas de agua rectas que se gene-

ran a la izquierda. La Fig. 3 es un dibujo simplificado de la Fig. 2, e indica que las ondas en el agua (pueden/no pueden) reflejarse en una barrera fija.

* * * * *

pueden

17. Panel 15, Fig. 3.

Las líneas más brillantes representan ..... de ondas (incidentes/reflejadas); las menos brillantes representan ondas (incidentes/reflejadas).

* * * * *

crestas
incidentes
reflejadas

18. Panel 15, Fig. 3.

Observando el diagrama, ¿diría usted que la ley de la reflexión expresada para los *rayos* de luz, también se podría aplicar a las *ondas* en el agua? (Sí/No).

* * * * *

Sí (el ángulo de incidencia es igual al de reflexión).

19. Panel 15, Fig. 3.

Trate de enunciar la ley, aplicada a las ondas.

* * * * *

El ángulo entre la dirección en que se mueve una onda incidente y la normal a la superficie reflectora, es igual al ángulo entre la normal y la dirección en que se mueve la onda reflejada.

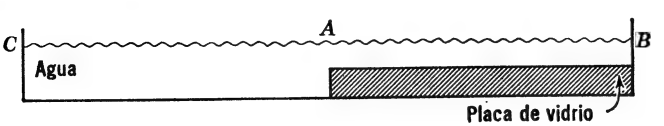
20. Panel 15, Fig. 2.

Los cuadros brillantemente delineados en la figura están en el espacio donde se cruzan las ondas incidentes con las reflejadas; son un ejemplo de un fenómeno de las ondas que se llama .....

* * * * *

interferencia

21. La rapidez de propagación de las ondas en el agua depende de la profundidad de ésta.



Cuando se generan ondas en *C* dentro del tanque de ondas, se propagan de *C* a *A* y de *A* a *B* con (la misma/diferente) rapidez.
* * * * *
diferente

22. Cuando se propagan ondas a diferente rapidez en una misma substancia (como el agua), decimos que se mueven en diferentes medios. Cuando las ondas del agua van de una profundidad a otra, mayor o menor, decimos que se mueven en (el mismo medio/diferentes medios).
* * * * *
diferentes medios

23. Refiérase al panel 16.
La letra en la esquina superior derecha es una ...
* * * * *
V

24. Panel 16.
Las ondas generadas en la parte inferior de la figura se mueven en un tanque de ondas dentro del que está una placa rectangular de vidrio. El agua que está encima de la placa representa un segundo ..... Las ondas incidentes la tocan oblicuamente y se (mueven como antes/desvían alejándose de su dirección original).
* * * * *
medio
desvían alejándose de su dirección original.

25. Panel 16.
Al pasar sobre la placa de vidrio las ondas incidentes se desvían, porque a diferentes profundidades las ondas del agua se propagan con (la misma rapidez/diferente rapidez). Esto es muy similar a la ..... que sufren los rayos de luz al pasar oblicuamente de un medio a otro.
* * * * *
diferente rapidez
refracción

26. Panel 16.
Esta figura nos indica que las ondas en el agua (se/no se) refractan al pasar oblicuamente de un medio a otro.
* * * * *
se

27. Hasta ahora tenemos alguna evidencia de que la luz es un fenómeno ondulatorio; hemos demostrado que tanto la luz como las ondas, se ..... y .....

* * * * *

en cualquier orden: refleja, refracta.

28. Refirámonos al panel 17.

La letra que está en la esquina superior derecha es una ...

* * * * *

P

29. Panel 17.

La figura 1 muestra la disposición que guarda un tanque de ondas para generar ondas ..... en el lado izquierdo, y permitir que pasen por una rendija entre un par de barreras. La rendija es (fija/ajustable).

* * * * *

rectilíneas
ajustable

30. Panel 17.

En las Figs. 2 a 4, las ondas rectilíneas de (la misma longitud de onda/diferentes longitudes de onda) se están generando y moviendo de (izquierda a derecha/derecha a izquierda).

* * * * *

la misma longitud de onda
izquierda a derecha

31. Panel 17.

En las Figs. 2 a 4, el claro entre las barreras (permanece igual/se ha hecho más pequeño/se ha hecho más grande).

* * * * *

se ha hecho más pequeño.

32. Panel 17.

En la Fig. 2, la distancia entre las barreras es (igual a/mayor que/menor que) la longitud de onda de las ondas que se están generando.

* * * * *

mayor que

33. Panel 17.

Examine las Figs. 2 a 4. A medida que disminuye el tamaño de la

abertura, las ondas se hacen (más/menos) circulares, después de pasar por ella.
* * * * *
más

34. Panel 17.
A medida que la abertura se hace más pequeña, las ondas rectilíneas incidentes se desvían (más/menos) alrededor de las barreras.
* * * * *
más

35. La desviación que sufre una onda rectilínea al pasar por el borde de una barrera se llama *difracción;* ésta (depende/no depende) del tamaño de la abertura por donde pase la onda.
* * * * *
depende

36. Panel 17.
En la Fig. 2, la abertura es mucho más grande que la longitud de la onda; la ..... es relativamente (grande/pequeña).
* * * * *
difracción
pequeña

37. Panel 17.
En la Fig. 4 la distancia entre las barreras es (mayor que/menor que/igual a) la longitud de onda. En este caso, la difracción es tan (grande/pequeña) que las ondas ..... incidentes emergen de la abertura como ondas .....
* * * * *
menor que
grande
rectas
circulares

38. Panel 17.
La Fig. 4 muestra que cuando el claro entre las barreras es igual o menor que la longitud de las ondas incidentes, esta abertura actúa como fuente de ....
* * * * *
ondas circulares

39. Panel 17.
Examine las Figs. 5 a 7. A medida que pasamos de una figura a la

otra, la longitud de onda (aumenta/disminuye/permanece igual) y el claro entre las barreras (aumenta/disminuye/permanece igual).
* * * * *
aumenta
permanece igual

40. Panel 17, Figs. 5 a 7.
La difracción es máxima cuando la abertura (es relativamente grande comparada con la longitud de onda/y la longitud de onda tienen aproximadamente las mismas dimensiones).
* * * * *
y la longitud de onda tienen aproximadamente las mismas dimensiones

41. Panel 17. Examine las Figs. 2 a 7.
La difracción que sufre una onda depende de las dimensiones relativas de su ..... de ..... y del tamaño de la ..... por la que pasa.
* * * * *
longitud (de) onda
abertura

42. Panel 17, Figs. 2 a 7.
Para que la difracción sea apreciable, *(a)* la longitud de onda debe ser relativamente pequeña y la abertura relativamente grande, o *(b)* la longitud de onda debe ser aproximadamente igual a la longitud de la abertura.
* * * * *
(b)

43. Panel 17.
Cuando la difracción es apreciable, la abertura que la origina actúa como una fuente puntual generadora de ondas .....
* * * * *
circulares

44. Cuando observamos que una abertura entre dos barreras actúa como fuente de ondas circulares, ¿qué sabemos acerca de la longitud de la onda incidente?
* * * * *
que es aproximadamente igual o mayor que la longitud de la abertura

45. Se sabe que el sonido es un fenómeno ondulatorio; podemos oír a una persona que habla detrás de una pantalla que nos impida verla.

Este es un ejemplo de la ..... de las ondas sonoras al pasar por una barrera.
* * * * *
difracción

46. A través de una puerta abierta podemos hablar a alguien que esté en la habitación contigua, aunque no podamos ver a la persona. Esto significa que la entrada a la habitación y la ..... de ..... del sonido tienen (aproximadamente las mismas/diferentes) dimensiones.
* * * * *
longitud (de) onda
aproximadamente las mismas

47. El hecho de que no podamos ver a través de las esquinas o dando vuelta a las paredes con la vista, podría indicar que la luz no fuese un fenómeno ondulatorio. *o* podría indicar que la longitud de onda de la luz es extremadamente (grande/pequeña) comparada con las dimensiones de las entradas a las habitaciones y por lo tanto su difracción es muy (grande/pequeña).
* * * * *
pequeña
pequeña

48. La investigación de los fenómenos ondulatorios nos lleva a la conclusión de que [*(a)* probablemente la luz no sea un fenómeno ondulatorio/*(b)* es posible que la luz sea un fenómeno ondulatorio].
* * * * *
(b)

PROBLEMAS

1. Describa lo que sucede a un pulso que se propaga en una cuerda, en cada uno de los siguientes casos: (1) se refleja en una barrera. (2) se refracta al entrar en una cuerda más delgada.

2. Explique la diferencia que hay entre una onda transversal y una longitudinal.

3. ¿Cuál es la rapidez de propagación de una onda que tiene una longitud de 4 cm y una frecuencia de 20 cps?

4. ¿Cuál es la frecuencia de una onda de 10 cm de longitud que recorre una longitud de onda en 2×10^{-2} seg?

5. ¿Cuál es la frecuencia de una onda que se mueve a 32 cm/seg y tiene una longitud de 0.4 cm? ¿cuál es su período?

6. ¿Cuál es la rapidez de propagación de una onda en el océano que tiene una longitud de onda de 30 metros y una frecuencia de 3 cps?

7. Si una onda tiene un período de 1/20 seg, ¿cuál es su frecuencia? (Dé la respuesta en ciclos por segundo).

8. Un botecito que sube y baja en la superficie del agua origina ondas en ella; oscila hacia arriba y abajo una vez por segundo. La rapidez de propagación de la onda es de 0.25 cm/seg. ¿Cuál es la frecuencia y la longitud de onda?

9. Explique las diferencias entre: amplitud y longitud de onda; amplitud y frecuencia; amplitud y rapidez de propagación.

10. Dos pulsos que están fuera de fase 180° se propagan desde los extremos opuestos de una cuerda. Dibuje dos ondas sinusoidales para cada uno, con una sobre la cuerda y otra bajo ella a 180° fuera de fase. En seguida haga otro dibujo de la superposición. Muestre la posición a 100% de interferencia destructiva.

11. ¿Cuál es la amplitud de una onda durante la interferencia destructiva total? Explique.

12. Suponga que dos pulsos en fase se mueven hacia abajo en una cuerda, en direcciones opuestas. ¿Qué sucede durante la superposición? *(Sugerencia:* Haga un dibujo de cada onda. Si las ondas se dibujan iguales, la nueva onda tendrá el doble de área bajo la curva).

13. ¿Qué sucede cuando dos ondas que están fuera de fase 180° se superponen sólo la mitad? Haga un diagrama de la nueva curva. Vea la *sugerencia* al problema 12.

14. ¿Qué sucede cuando dos ondas en fase se superponen la mitad del recorrido? Haga un diagrama. Vea la *sugerencia* al problema 12.

15. Describa las características físicas de una onda que se refleja en una barrera.

16. Compare las ondas viajeras con el impulso.

17. Si las ondas viajeras que se mueven entre dos barreras producen una onda estacionaria y la longitud de onda es de 8 cm, ¿cuál es la distancia entre los nodos?

18. En un radio con una longitud de onda de dos metros a lo largo de la antena, los nodos estarán a ..... metro(s) uno del otro. Si se usan ondas de 3 cm con el equipo apropiado, ¿cuál es la distancia entre los nodos? En ambos casos suponga una antena de media onda. ¿Cuántos nodos se presentarán?

19. Si un tanque de ondas tiene un metro de largo y las ondas tienen una longitud de 4 cm, ¿cuántos nodos se presentarán?

20. Explique por qué no puede usted mantener ondas estacionarias entre dos barreras separadas por una distancia de 1.1 m si la longitud de onda es 6 cm.

21. Explique la analogía entre la refracción en el vidrio y la refracción de una onda en el agua que se propaga de aguas profundas a aguas menos profundas.

22. Suponga que se disponen dos tanques de onda en tal forma que ambos generan ondas viajeras a través de una abertura de 1 cm en una barrera. En uno de ellos la longitud de la onda en el agua es de 1 cm, y en el otro es de 10 cm. ¿Qué sucederá en ambos casos a las ondas que emergen de la abertura?

CAPITULO 5

TEORIA ONDULATORIA DE LA LUZ

OBJETIVOS:

Al terminar el estudio de este capítulo el estudiante debe ser capaz de:

1. Enunciar las hipótesis de la teoría corpuscular de la luz e indicar en qué forma nuestras observaciones de los fenómenos de la luz, tales como las sombras, la reflexión y la refracción, confirman esta teoría.
2. Enumerar las condiciones que nos hacen concluir que la teoría corpuscular no puede explicar todos los fenómenos ópticos.
3. Describir el principio de Hyghens.
4. Describir el experimento de Young para mostrar la interferencia de la luz.
5. Usar los datos de los experimentos de la doble rendija para calcular las longitudes de onda y la frecuencia de la luz de diferentes colores.
6. Describir una rejilla de difracción.
7. Definir las distintas clases de espectros: continuo, de líneas brillantes y de absorción; indicar sus fuentes.
8. Definir las líneas de Fraunhofer y describir su importancia.

NOTA PRELIMINAR:

Una teoría es un conjunto de hipótesis sugeridas por observaciones y cuyo objeto es explicar éstas y predecir acertadamente otras observaciones que resulten de experimentos sugeridos por la teoría.

En este capítulo examinamos dos teorías de la luz; la corpuscular y la ondulatoria; históricamente ambas se desarrollaron casi al mismo tiempo, la corpuscular por Newton y la ondulatoria por el físico holandés Huyghens. Debido principalmente al gran prestigio de Newton y a la falta de observaciones que mostraron la difracción de la luz, la teoría corpuscular fue la aceptada inicialmente por la mayoría de los científicos.

La sección 1 de este capítulo examina comprobaciones de la teoría corpuscular y las áreas donde es deficiente. La sección 2 examina las semejanzas que hay entre las ondas y la luz, y sugiere un experimento para decidir entre las dos teorías de la luz.

Sección 1. La teoría corpuscular de la luz

1. Parte del trabajo de los científicos consiste en desarrollar conjuntos de hipótesis que expliquen sus observaciones y el resultado de sus experimentos. Por ejemplo, un conjunto de hipótesis formuladas para explicar las propiedades y el comportamiento que se observa en los gases se llama teoría cinética de los gases. Hemos observado algunas propiedades de la luz; entre ellas la reflexión, la refracción, la propagación rectilínea, etc. Un conjunto de ..... que nos permita explicar estas observaciones es lo que constituye una ..... de la luz.

* * * * *

hipótesis
teoría

2. Hace algunos siglos Newton formuló una teoría de la luz, a la que llamó "teoría corpuscular", suponiendo que la luz se componía de una infinidad de pequeñas partículas (a las que llamó corpúsculos) moviéndose a una gran rapidez. Una teoría adecuada de la luz debe explicar nuestras observaciones acerca de ella. La teoría corpuscular (debe/no necesita) explicar la formación de sombras por los cuerpos opacos.

* * * * *

debe

3. Refirámonos al panel 18.

La letra en la esquina superior derecha es una ...

* * * * *

M

4. Panel 18.

La figura 1 representa partículas de luz que emite una fuente *S* en diferentes direcciones. Debido a la presencia de la barrera, (algunas partículas/ninguna partícula) llegará(n) a la zona de la pantalla comprendida entre los puntos *A* y *B*.

* * * * *

ninguna partícula

5. Panel 18, Fig. 1.

Usando la terminología de la teoría ..... de la luz, la región de la pantalla comprendida entre *A* y *B* es una zona de sombra, porque las partículas de ..... de *S* no llegan a ella.

* * * * *

corpuscular
luz

6. Panel 18, Fig. 1.
La teoría corpuscular (explica/no explica) la formación de sombras.
* * * * *
explica

7. Panel 18.
La Fig. 2 es una ilustración de un balín de acero rebotando en una superficie rígida y pulida. Una cuidadosa medida indica que el ángulo 1 siempre es aproximadamente igual al 2. Esto sugiere que la teoría corpuscular de la luz proporciona una explicación adecuada de la ley de la .....
* * * * *
reflexión

8. Conforme a la teoría corpuscular, un haz es un conjunto de .... muy pequeñas que se propagan con una rapidez muy (grande/pequeña).
* * * * *
partículas
grande

9. Un haz de estas partículas que ilumina una superficie reflectora es semejante a las moléculas de un gas que bombardean las paredes de un recipiente. Tal haz debe ejercer una p..... en la superficie reflectora.
* * * * *
presión

10. Recientemente los científicos han descubierto la presión que ejerce un haz de luz. La existencia de esta presión luminosa (comprueba/no comprueba) la teoría corpuscular.
* * * * *
comprueba

11. Panel 18.
En la Fig. 3 vemos un balín de acero que rueda oblicuamente hacia abajo en el plano inclinado *AB*. Cuando llega al borde de *AB*, continúa rodando hacia abajo por el plano inclinado *BC*. ¿Qué plano está más inclinado, *AB* o *BC*?
* * * * *
BC

12. Panel 18, Fig. 3.

La componente de la fuerza que acelera al balín es mayor en el plano inclinado (*AB*/*BC*).

* * * * *

BC

13. Panel 18, Fig. 3.

Podemos considerar los planos inclinados *AB* y *BC* como dos medios a través de los cuales se mueve el balín; las líneas de trazos l_1 y l_2 son perpendiculares a *BD* en el punto en que el balín entra al plano inclinado *BC*. Usando términos de óptica, el ángulo *b* es de ..... y el ángulo *a* es de .....; l_1 y l_2 son las ..... al punto de incidencia.

* * * * *

refracción
incidencia
normales

14. Panel 18, Fig. 3.

A medida que el balín se desplaza del medio superior al inferior, su trayectoria se desvía (hacia/alejándose de) la normal.

* * * * *

hacia

15. La figura 3 del panel 18 indica que las trayectorias de las partículas materiales (se/no se) refractan, a medida que éstas pasan de un medio a otro.

* * * * *

se

16. Entonces podemos decir que, hasta este punto, la refracción óptica (es/no es) compatible con la teoría corpuscular de la luz.

* * * * *

es

17. Panel 18, Fig. 3.

Observe que el balín viaja más rápido en el medio (*AB*/*BC*) y que al hacerlo se desvía (hacia/alejándose de) la normal.

* * * * *

BC
hacia

18. Hemos visto que cuando la luz pasa oblicuamente del aire a algún

otro medio como el agua, el vidrio, etc., se desvía (hacia/alejándose de) la normal.
* * * * *
hacia

19. Si la teoría corpuscular de la luz fuera completamente compatible con los fenómenos ópticos, deberíamos suponer que un rayo de luz al pasar oblicuamente del aire al vidrio, o al agua, se desviara hacia la normal, porque en el vidrio o en el agua se propagara con (mayor/menor) rapidez que en el aire.
* * * * *
mayor

20. Experimentalmente se ha mostrado que la luz se propaga más aprisa en el aire que en el agua o el vidrio; esto significa que la teoría corpuscular (es/no es) completamente compatible con lo que sabemos acerca de los fenómenos de la luz.
* * * * *
no es

21. Refiérase al panel 19.
La letra en la esquina superior derecha es una ...
* * * * *
Q

22. Panel 19. Vea la Fig. 1.
A la luz de una fuente puntual se le permite pasar por dos rendijas hechas en una barrera opaca muy angostas (*ab* y *cd*) y muy cercanas entre sí. Conforme a la teoría corpuscular de la luz, las áreas p_1p_2 y p_3p_4 deben estar (iluminadas/obscuras), mientras que el área entre p_2 y p_3, la que está arriba de p_1 y la abajo de p_4, deben estar (iluminadas/obscuras).
* * * * *
iluminadas
obscuras

23. Panel 19.
La figura 1 muestra lo que debemos esperar que suceda según la hipótesis de la .... de la luz. La figura 2 muestra lo que sucede realmente. Cuando la luz de una fuente puntual pasa por dos rendijas muy angostas en una barrera opaca, en la pantalla aparece una franja (brillante/obscura) equidistante de las rendijas.
* * * * *
teoría corpuscular
brillante

24. Panel 19, Fig. 2.

Arriba y abajo de la franja brillante central hay franjas brillantes y obscuras alternadas. Este fenómeno (es/no es) explicado con la teoría corpuscular.

* * * * *

no es

25. ¿Cuáles de los siguientes fenómenos ópticos son explicados por la teoría corpuscular?:

(a) la refracción hacia la normal, cuando la luz pasa oblicuamente del aire al agua.
(b) la reflexión regular en una superficie pulida.
(c) la formación de sombras.
(d) la propagación rectilínea.
(e) la presión que ejerce la luz.
(f) el experimento de la doble rendija del panel 19.

* * * * *

(b), (c) (d), (e)

26. ¿Cuál(es) de las siguientes afirmaciones se explican, o se pueden predecir, con la teoría corpuscular?:

(a) Algún día se podrá empujar con la luz solar una nave cohete a través del espacio.
(b) La rapidez de propagación de la luz es mayor en el aire que en el vidrio.
(c) La rapidez de propagación de la luz es mayor en el agua que en el aire.

* * * * *

(a), (c)

Sección 2. Ondas y luz.

Ondas de Huyghens; ondas secundarias.

El principio de Huyghens explica la difracción de las ondas en el agua.

Si la luz se difracta, podemos explicar el experimento de la doble rendija

1. Hemos visto que la teoría corpuscular (puede/no puede) explicar todos los fenómenos ópticos.

* * * * *

no puede

2. Una teoría de la luz más adecuada debe explicar no sólo lo que la corpuscular no puede, sino también lo que ésta *explica* adecuadamente. Tal teoría (debe/no necesita) explicar la reflexión de la luz.

* * * * *

debe

3. Veamos el panel 15.

Las Figs. 2 y 3 muestran que las (ondas/partículas) se reflejan en barreras al igual que la luz, es decir, se reflejan en tal forma que .... *(complete).*

* * * * *

ondas
el ángulo de incidencia es igual al de reflexión

4. Panel 15.

Las figuras 2 y 3 muestran que la hipótesis de que la luz consiste en ondas es adecuada para explicar el fenómeno óptico llamado .....

* * * * *

reflexión

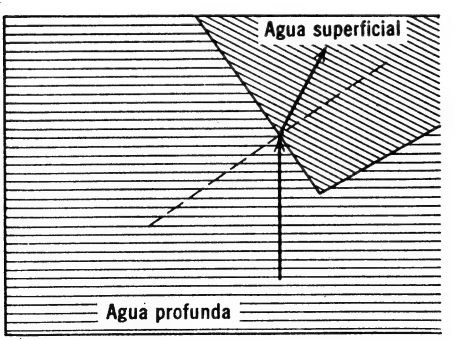
5. Refiérase al panel 16.

Esta figura muestra que las (ondas/partículas) se ..... al pasar de un medio a otro.

* * * * *

ondas
refractan

6.



Este es un esquema simplificado de la ilustración mostrada en el panel 16. Las flechas negras representan la dirección en que se mueven las ondas

incidentes y las refractadas. La línea de trazos es la ..... a la superficie refractora.

* * * * *

normal

7. Refiérase a la figura del marco anterior. Las ondas del agua se propagan más rápidamente en agua profunda que en superficial. En esta figura, las ondas pasan de un medio más (rápido/lento) a uno más (rápido/lento), y al hacerlo se desvían (hacia/alejándose de) la normal.

* * * * *

rápido
lento
hacia

8. Al considerar la refracción de una partícula (en el panel 18, Fig. 3) vimos que la trayectoria de ésta se desvió hacia la normal cuando pasó del medio más ..... al medio más .....

* * * * *

lento
rápido

9. Cuando un haz de luz pasa oblicuamente de un medio más ..... a otro más ....., se desvía hacia la normal. La teoría (ondulatoria/corpuscular) de la luz explica más adecuadamente la refracción de la luz.

* * * * *

rápido
lento
ondulatoria

10. En el capítulo 4 vimos que podíamos transferir energía de un lugar a otro: (1) lanzando una partícula de un lugar a otro, ó (2) enviando un ..... de ..... de un lugar a otro de un medio.

* * * * *

pulso (de) onda

11. Las ondas (pueden/no pueden) transmitir energía. La teoría ondulatoria de la luz (es/no es) adecuada para explicar la presión de la luz.

* * * * *

pueden
es

12. Si la luz es un fenómeno ondulatorio, también tenemos que considerar la forma en que se propaga una onda a partir de su origen. Huy-

ghens, físico holandés, enunció el principio de la propagación de las ondas que se ilustra en el panel 20. La letra que está en la esquina superior derecha es una ...

* * * * *

A

13. Examine el panel 20 y lea la descripción que está abajo de la figura. Conforme al principio de ....., en cualquier instante cada punto de un frente de onda puede actuar como una fuente ..... desde la cual se difunden simultáneamente ..... secundarias.

* * * * *

Huyghens
puntual
ondas

14. Panel 20.

La curva que circunda a todas las ondas secundarias trazadas desde (el mismo frente de onda/diferentes frentes de onda) se llama .... y representa el ..... de ..... en algún instante posterior.

* * * * *

el mismo frente de onda
envolvente
frente (de) onda o pulso (de) onda

15. Panel 20.

Para construir el frente de onda de algún instante posterior, construimos .... en todos los puntos del frente de onda 3, y en seguida construimos la ..... de todas éstas; el resultado es el frente de onda ... *(número)* en el diagrama.

* * * * *

ondas secundarias
envolvente
4

16. Conforme al principio de Huyghens, (algunos puntos/cualquier punto) de un frente de onda en movimiento se puede(n) considerar como una nueva ..... *(complete).*

* * * * *

cualquier punto
fuente puntual (de ondas, o de ondas secundarias)

17. Refirámonos al panel 21.

La letra que está en la esquina superior derecha es una ...

* * * * *

F

18. Panel 21.

En la Fig. 1, en la fuente *S* se generan ondas circulares. Cuando estas ondas llegan a la barrera, se reflejan o se absorben (no se ilustra en la figura) excepto la parte de ellas que llega a la rendija S_1. Aplicando el principio de Huyghens, cualquier punto de la rendija actuará como ..... *(complete).*

* * * * *

una fuente puntual de ondas.

19. Panel 21, Fig. 1.

Si la rendija de la barrera es extremadamente pequeña comparada con la longitud de onda de la onda original, la onda se .....ará al pasar por la rendija.

* * * * *

difractará

20. Por lo tanto, podemos usar el principio de ..... para explicar el fenómeno de la ..... que sufren las ondas al pasar por rendijas angostas en una barrera.

* * * * *

Huyghens
difracción

21. Panel 21.

En la Fig. 2 hay ..... *(número)* rendijas en la barrera. Cuando la onda generada originalmente en *S* llega a la barrera, se generan ..... *(número)* nuevas ondas en .... y .... *(use símbolos).*

* * * * *

dos
dos
S_1 (y) S_2

22. Panel 21, Fig. 2.

En el lado derecho de la barrera tenemos dos ondas que se mueven en el mismo medio. Recuerde lo que sucedió cuando teníamos dos ondas recorriendo la misma cuerda. Cuando interaccionan dos o más ondas en el mismo medio, tenemos el fenómeno llamado .....

* * * * *

interferencia

23. Panel 21, Fig. 2.

Los círculos y arcos de línea continua representan crestas de onda; los puntos marcados con una *X* son aquellos en los que interaccionan dos ..... de .... y ..... En estos puntos (hay interferencia constructiva/hay interferencia destructiva/no hay interferencia).

* * * * *

crestas
S_1 (y) S_2
hay interferencia constructiva

24. Panel 21.

La Fig. 3 representa la misma situación descrita en la Fig. 2; ahora se han incluido los senos o valles de las ondas, representados por las líneas de trazos. En el lado derecho de la barrera, siempre que dos valles de S_1 y S_2 interaccionan, interfieren (constructivamente/destructivamente).

* * * * *

constructivamente

25. Panel 21, Fig. 3.

Siempre que un seno y una cresta interaccionan, el resultado es (una interferencia constructiva/una interferencia destructiva/que no hay interferencia).

* * * * *

una interferencia destructiva

26. Panel 21, Fig. 3.

Hay interferencia constructiva en (*a*/*b*/*c*/*d*/*e*)
Hay interferencia destructiva en (*a*/*b*/*c*/*d*/*e*).

* * * * *

a, b, d
c, e

27. Panel 21, Fig. 3.

Suponiendo que la luz fuera un fenómeno ondulatorio y que *S* fuera una fuente de ondas luminosas, los puntos donde ocurriera la interferencia destructiva aparecerían (brillantes/obscuros) en una pantalla. Los puntos donde ocurriera la interferencia constructiva aparecerían (brillantes/obscuros) en la pantalla.

* * * * *

obscuros
brillantes

28. Regrese al panel 19.

Vimos que la teoría corpuscular (explicó/no explicó) el resultado que se obtuvo experimentalmente en la Fig. 2.

* * * * *

no explicó

29. Panel 19.

Si la luz es realmente un fenómeno ondulatorio, conforme al .... de ..... las franjas brillantes en la pantalla de la Fig. 2 representan puntos en los que interfieren ..... las ondas generadas en las rendijas. Las franjas obscuras representan puntos en los que estas ondas interfieren .....

* * * * *

principio (de) Huyghens
constructivamente
destructivamente

30. Marque cada uno de los fenómenos alistados abajo como explicable mediante *(a)* la teoría ondulatoria únicamente, *(b)* la teoría corpuscular únicamente o *(c)* cualquiera de las dos teorías:

I. La presión de la luz.
II. La desviación de la luz hacia la normal, cuando pasa oblicuamente del aire al agua.
III. La sucesión de franjas brillantes y obscuras resultante del experimento de la doble rendija (Fig. 2, Panel 19).
IV. La reflexión.

* * * * *

I. *(c)*
II. *(a)*
III. *(a)*
IV. *(c)*

31. Podemos explicar la ..... que sufren las ondas del agua cuando pasan por una abertura muy angosta aplicando el .... de ..... y suponiendo que la abertura actúa como una ..... *(complete).*

* * * * *

difracción
principio (de) Huyghens
fuente puntual de ondas

Sección 3. El experimento de Young; medida de la longitud de onda de la luz

Al mostrar que la luz exhibe los fenómenos de difracción e interferencia se tendrá una demostración patente para la teoría ondulatoria. A fines del Siglo XVIII, Young hizo no sólo esto sino que también desarrolló un método experimental para medir la longitud de onda de la luz. De este modo se puso de manifiesto el porqué no había sido posible hasta entonces observar la difracción y la interferencia de las ondas de luz.

En su extrema sencillez y su profundo significado para la comprensión del mundo físico que nos rodea, el experimento de Young debe figurar entre los logros sobresalientes de la historia de la ciencia.

1. En la sección 7 del capítulo 4 vimos que cuando las ondas del agua pasaban por una abertura en una barrera, se desviaban alrededor de sus bordes. A este fenómeno lo llamamos .....

* * * * *

difracción

2. De ordinario la luz (se/no se) desvía alrededor de los bordes de una abertura en una barrera. Prueba de esto es el hecho de que una fuente puntual de luz y un cuerpo opaco producen una ..... claramente definida.

* * * * *

no se
sombra

3. En el capítulo 4 (y panel 17) vimos que la difracción de las ondas en el agua no siempre es apreciablemente grande. Cuando pasan por una pequeña abertura ondas de longitud relativamente grande, la cantidad de difracción es (apreciable/despreciable). Cuando pasan ondas de longitud relativamente pequeña por una abertura grande, la cantidad de difracción es (apreciable/despreciable).

* * * * *

apreciable
despreciable

4. Por ejemplo: podemos explicar por qué la luz no se difracta apreciablemente al pasar por una ventana abierta si podemos comprobar que su longitud de onda es (grande/pequeña) comparada con las dimensiones de la ventana.

* * * * *

pequeña

5. Por lo tanto, si hemos de considerar a la luz como un fenómeno ondulatorio, es necesario obtener alguna idea cuantitativa de su ..... de .....

* * * * *

longitud (de) onda

6. Refirámonos al panel 22.

La letra en la esquina superior derecha es una ...

* * * * *

K

7. Panel 22.

Examine la Fig. 1 y lea el párrafo descriptivo. El color de la luz monocromática empleada en este experimento es ..... La distancia entre la pantalla que tiene rendijas S_1 y S_2 y la pantalla sobre la que aparece el patrón de interferencia es de ... m.

* * * * *

verde
2

8. Panel 22, Fig. 1.

El Sol (es/no es) una fuente puntual de luz. Conforme al principio de Huyghens, *S* proporciona una .... de luz.

* * * * *

no es
fuente puntual

9. Panel 22, Fig. 1.

El objeto de las perforaciones S_1 y S_2 es el de proporcionar fuentes puntuales de .....s de luz, que interferirán y producirán franjas ..... en P_0, P_1, P_2, etc., y franjas ..... entre ellas.

* * * * *

onda(s)
brillantes
obscuras

10. Panel 22.

La figura 2 es un esquema simplificado de la Fig. 1 y que podemos usar para calcular la longitud de onda de la luz monocromática verde. En el párrafo descriptivo de la Fig. 1 se rijan las distancias necesarias que aparecen en la Fig. 2.

$d = S_1S_2 =$ ..... m
$x = P_0P_1 =$ ..... m
$MP_0 =$ ... m

* * * * *

2×10^{-4}
5×10^{-3}
2

11. Panel 22, Fig. 2.

P_1 es un punto donde una onda de S_1 interfiere (constructivamente/destructivamente) con una onda de ...

* * * * *

constructivamente
S_2

12. Panel 22, Fig. 2.

Para que ocurra interferencia constructiva, la diferencia entre las distancias S_1P_1 y S_2P_1 debe ser (una/la mitad de una) longitud de onda.

* * * * *

una

13. Panel 22, Fig. 2.

Usando P_1 como centro, trazamos un arco de radio S_1P_1. Este arco (que por ser muy corto parece un segmento de recta) corta a S_2P_1 en K. Esto significa que $S_1P_1 = K$ ...., y que $S_2K = S_2P_1 - S_1$...

* * * * *

P_1
P_1

14. Panel 22, Fig. 2.

Pero ya vimos que para que haya interferencia constructiva en P_1, $S_2P_1 - S_1P_1 = .. \lambda$ *(número)*.

* * * * *

1

15. Panel 22, Fig. 2.

$S_2K = (S_2P_1 - S_1P_1)$
y $(S_2P_1 - S_1P_1) = \lambda$
Por lo tanto, $S_2K = \ldots$

* * * * *

λ

16. Panel 22, Fig. 2.

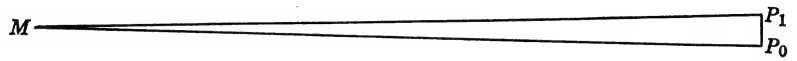
En este experimento, el arco S_1K siempre es muy pequeño comparado con su radio y, por conveniencia, podemos considerarlo como línea recta. Hay teoremas de geometría que nos permiten demostrar que el triángulo S_1KS_2 es semejante al MP_1P_0. Puesto que los lados correspondientes de triángulos semejantes son proporcionales, escribimos:

$$\frac{S_1S_2}{MP_1} = \frac{\quad}{P_1P_0}$$

* * * * *

S_2K

17. Panel 22.



Si dibujáramos a escala la Fig. 2, sería algo parecida a la anterior. La diferencia entre MP y MP_0 es muy (grande/pequeña).

* * * * *

pequeña

18. Panel 22, Fig. 2.
En la figura vemos que:

$$\frac{S_1S_2}{MP_1} = \frac{S_2K}{P_1P_0}$$

Puesto que $MP_1 \approx MP_0$ y $S_2K = \lambda$, podemos hacer substituciones y volver a escribir la ecuación así: .....

* * * * *

$$\frac{S_1S_2}{MP_0} = \frac{\lambda}{P_1P_0}$$

19. Panel 22, Figs. 1 y 2.
Sean: d = distancia entre las rendijas de la pantalla C (es decir, $d = S_1S_2$), y x = distancia entre la franja brillante central en la pantalla D y la siguiente franja brillante arriba o abajo de ella (es decir, $x = P_1P_0$). Entonces:

$$\frac{d}{MP_0} = \frac{\quad}{\quad}$$

* * * * *

λ

x

20. Panel 22, Fig. 2.
Sea L = distancia entre las pantallas C y D. Entonces:

$$\frac{d}{\ldots} = \frac{\ldots}{\ldots}$$

* * * * *

$$\frac{d}{L} = \frac{\lambda}{x}$$

21. Panel 22. $\frac{d}{L} = \frac{\lambda}{x}$

Despejando λ:

$\lambda =$ ..... (use los símbolos L, x, d).

* * * * *

$$\frac{xd}{L}$$

22. Panel 22.

Ahora tenemos una ecuación que nos dará un valor muy aproximado de la longitud de onda de la luz monocromática verde usada en el experimento de Young de la doble rendija. Substituyendo los datos proporcionados por la Fig. 1 y calculando:

* * * * *

$$\lambda = \frac{xd}{L} = \frac{(5 \times 10^{-3}\,\text{m})\,(2 \times 10^{-4}\,\text{m})}{2\,\text{m}}$$

$$= \frac{10 \times 10^{-7}\,\text{m}^2}{2\,\text{m}} = 5 \times 10^{-7}\,\text{m}$$

23. (Advertimos/no advertimos) que se difracta la luz que entra por una ventana o por una puerta. Esto se debe a que la longitud de onda de la luz es demasiado (grande/pequeña).

* * * * *

no advertimos
pequeña

24. Panel 22, Fig. 1.

Cuando reemplazamos el filtro monocromático verde con uno rojo, encontramos que la distancia entre P_0 y P_1 aumenta. Esto significa en la ecuación $\lambda = \frac{xd}{L}$ que x (aumenta/disminuye/permanece igual), lo

que indica que la longitud de onda de la luz roja es más (larga/corta) que la de la luz verde.

* * * * *

aumenta
larga

25. Panel 22, Fig. 1.

Cuando se usa un filtro violeta en este experimento, la distancia entre P_0 y P_1 es menor que con la luz verde, lo que significa que la longitud de onda de la luz violeta es (mayor que/menor que/igual a) la longitud de onda de la luz verde.

* * * * *

menor que

26. Con el experimento de Young podemos asignar una ..... de ..... a la luz monocromática de diferentes colores.

* * * * *

longitud (de) onda

27. La luz monocromática roja se usa para observar el patrón de interferencia que produce una doble rendija. Los centros de las dos rendijas están separados por una distancia de 0.5 mm; la distancia a la pantalla D es de 2 m, y la distancia entre la franja brillante central y la siguiente franja brillante arriba de ella es de 2.4 mm.

d = ... m
L = ... m
x = ... m

La longitud de onda de la luz roja es de ..... m.

* * * * *

$d = 0.5\text{ mm} = 5 \times 10^{-4}\text{ m}$
$L = 2\text{ metros}$
$x = 2.4\text{ mm} = 2.4 \times 10^{-3}\text{ m}$

$$\lambda = \frac{xd}{L} = \frac{(2.4 \times 10^{-3}\text{ m})(5 \times 10^{-4}\text{ m})}{2\text{ m}} = 6 \times 10^{-7}\text{ m}$$

28. Puesto que la longitud de onda de la luz es extremadamente pequeña, con frecuencia es conveniente usar una unidad más pequeña que el metro para medirla. Esta es la unidad Angstrom (Å):

1 metro = 10^{10} Å
1 Å = ... metro.

* * * * *

10^{-10}

29. Vimos que la longitud de onda de la luz monocromática roja era aproximadamente de 6×10^{-7} m. En unidades Angstrom es: .....

* * * * *

$1\text{ m} = 10^{10}$ Å

$6 \times 10^{-7}\text{ m} = (6 \times 10^{-7})(10^{10}\text{ Å}) = 6000\text{ Å}$, o bien 6×10^{3} Å.

30. En un experimento de interferencia se emplea una fuente de luz roja ($\lambda = 6500$ Å). La luz pasa por dos rendijas que están a 10^{-4} m una de la otra. La distancia entre la franja brillante central y la franja brillante que le sigue arriba es de un centímetro.

$d =$ ..... m

$x =$ ..... m

$\lambda =$ ..... m

Calcule la distancia entre las rendijas y la pantalla.

$L =$ ..... m

* * * * *

$d = 10^{-4}$ m

$x = 10^{-2}$ m

$\lambda = 6500\text{ Å} = 6500 \times 10^{-10}\text{ m} = 6.5 \times 10^{-7}\text{ m}$

$$6.5 \times 10^{-7}\text{ m} = \frac{(10^{-4})(10^{-2})\text{ m}^2}{L}$$

$$L = \frac{10^{-6}}{6.5 \times 10^{-7}}\text{ m} = 1.5\text{ m}$$

31. Con cualquier onda periódica están asociadas tres cantidades físicas por lo menos:

(1) rapidez (use c para la rapidez de la luz en el vacío).

(2) longitud de onda (λ).

(3) frecuencia (f)

Estas se relacionan en la ecuación: $c =$ .....

* * * * *

$f\lambda$

32. La rapidez de propagación de la luz en el vacío es de ..... m/seg.

* * * * *

3×10^{8}

33. Para las ondas de luz, $c = f\lambda$.

Si c se mide en m/s, λ se mide en .....

Si c se mide en km/s, λ se mide en .....

* * * * *

m, *o* metros

km, *o* kilómetros

34. En el experimento de Young de la doble rendija, la longitud de onda de la luz verde es de 5000 Å.

5000 Å = ... metro

Calcule la frecuencia de la luz de este color.

* * * * *

$5000\ \text{Å} = (5000)(10^{-10}\ \text{m}) = 5 \times 1^{-7}\ \text{m}$

$c = f\lambda$

$3 \times 10^{8}\ \text{m/seg} = (5 \times 10^{-7}\ \text{m})f$

$f = 6 \times 10^{14}$ ciclos/s

35. Los colores de la luz blanca policromática que dispersa un prisma son: rojo, anaranjado, amarillo, verde, azul y violeta. Experimentalmente se muestra que a medida que vamos del rojo al violeta las longitudes de onda disminuyen, aproximadamente, de 7000 a 4000 Å. Esto significa que, a medida que vamos del rojo al violeta, las frecuencias (aumentan/disminuyen) de ..... a ..... ciclos por segundo.

* * * * *

aumentan

$\lambda(\text{violeta}) = 4000\ \text{Å} = 4 \times 10^{-7}\ \text{m}$

$$f(\text{violeta}) = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \times 10^{8}}{4 \times 10^{-7}} = 7.5 \times 10^{14}\ \text{ciclos/seg}$$

$\lambda(\text{rojo}) = 7000\ \text{Å} = 7 \times 10^{-7}\ \text{m}$

$$f(\text{rojo}) = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \times 10^{8}}{7 \times 10^{-7}} = 4.3 \times 10^{14}\ \text{ciclos/seg}$$

36. El experimento de Young de la doble rendija proporciona una medida cuantitativa de la ..... de ..... y de la ..... de las (ondas/partículas) de luz. Indirectamente, nos permite explicar por qué usualmente es imposible observar la difracción de la luz cuando pasa a través de ventanas, puertas, etc. La longitud de onda de la luz es demasiado (grande/pequeña) para exhibir difracción observable bajo condiciones ordinarias.

* * * * *

longitud (de) onda
frecuencia
ondas
pequeña

Sección 4. Rejillas de difracción y espectros

El análisis espectral es una de las principales herramientas de la física experimental moderna. En esta sección consideraremos únicamente el origen de ciertas clases importantes de espectros; sus usos en los fundamentos de la física atómica se tratarán en el volumen 4 de esta serie.

1. En el experimento de la doble rendija dedujimos la ecuación:

$$\lambda = \frac{xd}{L}$$

donde ... representa la separación entre las rendijas, y ... la distancia entre la franja brillante central del patrón de interferencia de la pantalla y la franja brillante adyacente.

* * * * *

d; x

2. Despeje x en la ecuación: $\lambda = \frac{xd}{L}$

Entonces, $x =$ .....

Esto indica que a medida que aumenta la longitud de onda de la luz que se está usando, la distancia entre la franja brillante central y la franja brillante que sigue en la pantalla (aumenta/disminuye/permanece constante).

* * * * *

$\frac{\lambda L}{d}$; aumenta

3. Puesto que $x = \frac{\lambda L}{d}$; a medida que la separación entre las rendijas se hace más pequeña, la distancia entre franjas brillantes adyacentes en la pantalla, (aumenta/disminuye/permanece constante).

* * * * *

aumenta

4. Para ensanchar el patrón de interferencia (y así facilitar su examen), la separación entre rendijas debe (aumentarse/disminuirse). Si se usan muchas rendijas (en vez de dos solamente), es de suponer que pasará (más/menos) luz para formar el patrón de interferencia.

* * * * *

disminuirse; más

5. Grabando surcos en una placa de vidrio, con una máquina de grabar muy precisa y una punta de diamante, se logra un gran número de rendijas con una separación muy pequeña. El resultado es una *rejilla de difracción.* La separación entre las dos rendijas del experimento de Young es a menudo de 0.05 cm aproximadamente. En una rejilla de difracción hay frecuentemente 4000 rendijas por cm. Esta es una separación entre rendijas de aproximadamente ..... cm

* * * * *

$\frac{1 \text{ cm}}{4000} = 0.00025 \text{ cm}$, o bien $2.5 \times 10^{-4} \text{ cm}$

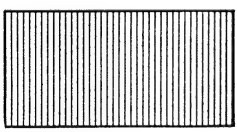
(Esta es una separación aproximadamente 200 veces más pequeña que en el experimento de la doble rendija.)

6. En una rejilla de difracción, los espacios obscuros del patrón de interferencia son más (anchos/angostos) porque la separación entre las rendijas es (mayor/menor) que la de la doble rendija. Debido a que por un gran número de rendijas pasa más luz que por solamente dos, en la rejilla de difracción los espacios brillantes son (más/menos) brillantes. En conjunto, estos factores hacen que el patrón formado por una rejilla de difracción sea (más/menos) definido que en las dos rendijas del experimento de Young.

* * * * *

anchos
menor
más
más

7.



Una placa de vidrio (vea la figura) sobre la cual se han trazado un gran número de surcos paralelos, a través de los cuales la luz forma un patrón de interferencia, constituye una ....

* * * * *

rejilla de difracción

8. En general, las rendijas están más (juntas/separadas) en el experimento de la doble rendija que en la rejilla de difracción. El patrón de

interferencia que forma la (doble rendija/rejilla de difracción) es generalmente más definido y fácil de examinar.

* * * * *

separadas
rejilla de difracción

9. $x = \dfrac{\lambda L}{d}$

A medida que se aumenta la longitud de onda de la luz, la distancia entre franjas brillantes en un patrón de interferencia (aumenta/disminuye/permanece igual).

* * * * *

aumenta

10. La longitud de onda de la luz monocromática amarilla es menor que la de la luz monocromática roja. Si usamos la misma rejilla de difracción para producir patrones de interferencia de luz amarilla y de luz roja, la distancia entre las franjas rojas será (mayor/menor) que la de las franjas amarillas.

* * * * *

mayor

11. La luz blanca es (monocromática/policromática).

* * * * *

policromática

12. Refirámonos al panel 23. La letra en la esquina superior derecha es una ....

* * * * *

W

13. Panel 23.

En la Fig. 1 vemos la luz blanca que viene de la izquierda y se difracta en la rejilla. Solamente se han dibujado algunos rayos partiendo de cada rendija, pero son suficientes para ilustrar lo que se observa experimentalmente. Cada uno de los colores monocromáticos originales de la luz blanca interfiere constructivamente (en todas direcciones/solamente en una dirección particular), porque la distancia entre las franjas brillantes del patrón de la pantalla depende de la ..... de ..... de la luz monocromática que se difracte.

* * * * *

solamente en una dirección particular
longitud (de) onda

14. Por lo tanto, se puede usar una rejilla de difracción casi como un prisma, puesto que dispersa la luz policromática incidente en sus colores .....cromáticos.

* * * * *

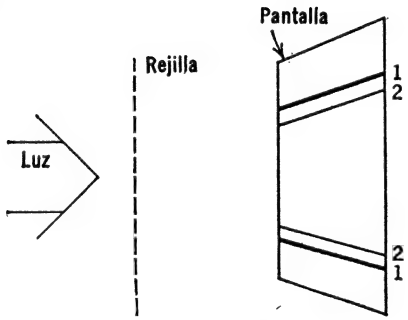
mono(cromáticos)

15. La longitud de onda de la luz roja es de 7×10^{-7} m; de la luz verde, 5×10^{-7} m; de la luz violeta, 4×10^{-7} m. En la Fig. 2 del panel 23 vemos que la rejilla de difracción esparce la luz blanca en forma de una banda de colores a cada lado de una franja blanca central. El color de cada una de las franjas *A* es (rojo/verde/violeta); el color de las franjas *B* es (rojo/verde/violeta), porque, de estos tres colores de luz, el ..... es el que más se difracta, y el ..... el que menos se difracta.

* * * * *

rojo
violeta
rojo
violeta

16.



Si por una rejilla de difracción hacemos pasar luz policromática que contenga rojo y verde monocromáticos, el color en 1 será (rojo/verde/violeta), y en 2 será (rojo/verde/violeta).

* * * * *

rojo
verde

17. Cuando la luz policromática pasa por una rejilla de difracción, sus colores monocromáticos componentes quedan dispuestos en la pantalla según sus .....s de .....

* * * * *

longitud(es) (de) onda

18. Cuando la luz policromática se dispersa en sus colores monocromáticos componentes de acuerdo con sus longitudes de onda, la serie de colores que se forma se llama *espectro.* Repase el panel 9, Fig. *(b).* La dispersión de la luz blanca mediante un prisma de vidrio flint (produce/no produce) un espectro.

* * * * *

produce

19. Si cierta clase de luz amarilla que pase por una rejilla de difracción se dispersa en una pantalla formando luces monocromáticas roja y verde, decimos que las franjas roja y verde son el ..... de esta luz amarilla.

* * * * *

espectro

20. Tanto los prismas como las rejillas de difracción se usan para producir el ..... de luz policromática.

* * * * *

espectro

21. Refiérase al panel 24. La letra en la esquina superior derecha es una ...

* * * * *

P

22. Panel 24.

La materia se vuelve incandescente cuando se calienta a una temperatura a la que emite ..... Cuando la luz de un gas incandescente (como por ejemplo, sodio, helio, hidrógeno, neón, etc.) a baja o moderada presión pasa por una rejilla de difracción, su espectro consiste en diversas líneas coloreadas sobre fondo negro. Este espectro se llama *de líneas brillantes* o *de emisión.* La figura 1 (es/no es) un espectro de emisión. La figura 3 (es/no es) un espectro de emisión.

* * * * *

luz
no es
es

23. Panel 24.

La figura 2 es un espectro ..... o ....
.....

* * * * *

de emisión
de líneas brillantes

24. Panel 24.

La luz de un sólido, líquido o gas incandescente y a muy alta presión produce un espectro *continuo.* Un espectro continuo es un conjunto completo de colores, desde el rojo en un extremo hasta el violeta en el otro. La figura 4 (es/no es) un espectro continuo. La figura 1 (es/no es) un espectro continuo.

* * * * *

no es
es

25. El espectro de líneas brillantes o de emisión lo produce un .... a baja o moderada presión; es una serie de ..... de colores brillantes sobre un fondo .....

* * * * *

gas incandescente
franjas *o* líneas
obscuro *o* negro

26. El espectro que produce un sólido o líquido incandescente se llama espectro ..... Puesto que la luz de tal fuente debe contener todos los colores, desde el rojo hasta el violeta, debe ser luz policromática (blanca/coloreada).

* * * * *

continuo
blanca

27. La luz que emite un ..... o ..... incandescente, produce un espectro continuo.

* * * * *

en cualquier orden: sólido, líquido

28. Un gas incandescente sometido a muy *alta presión* emite luz blanca; esto significa que produce un espectro (de líneas brillantes/continuo).

* * * * *

continuo

29. Panel 24.

La figura 3 es el espectro del hidrógeno incandescente a (alta/baja) presión. Si la figura 1 fuera el espectro del hidrógeno incandescente, sabríamos que el gas se mantuvo a (alta/baja) presión.

* * * * *

baja
alta

30. Sabemos que nuestro sol está formado por gases incandescentes. No obstante, advertimos que su luz es blanca. Explique por qué.

* * * * *

los gases incandescentes deben estar a muy altas presionas

31. Un espectro continuo es producto de la luz de un ....., ... o ..... incandescentes a ..... presión. Un espectro de emisión es producto de la luz de un ..... incandescente a ..... *(complete).*

* * * * *

en cualquier orden: sólido, líquido, gas
alta
gas
baja o moderada presión

32. Refiérase al panel 25.

La letra en la esquina superior derecha es una ...

* * * * *

G

33. Lea el panel 25.

En el experimento mostrado aquí la luz blanca pasa a través de un vapor (calentado/no calentado) hasta la incandescencia, (antes/después) de pasar por una rejilla de difracción; el espectro resultante se muestra en la pantalla.

* * * * *

no calentado
antes

34. El espectro producido en el experimento descrito en el panel 25 se llama *de absorción;* consiste en (líneas brillantes sobre un fondo que de otra manera sería obscuro/líneas obscuras sobre un espectro que de otra manera sería continuo).

* * * * *

líneas obscuras sobre un espectro que de otra manera sería continuo

35. Panel 24. Compare las Figs. 2 y 4.

La figura 2 es un espectro de (emisión/absorción) del sodio. La figura 4 es un espectro de (emisión/absorción) del .....

* * * * *

emisión
absorción
sodio

36. Panel 24. Compare las Figs. 3 y 6.
La figura 3 es el espectro de ..... del hidrógeno. La figura 6 es un espectro de .....

* * * * *

emisión
absorción

37. Las líneas obscuras de un espectro de absorción están en las mismas posiciones (longitudes de onda) en que aparecen las líneas .... cuando el vapor que se usa está ..... y se mantiene a una presión .....

* * * * *

brillantes
incandescente
baja *o* moderada

38. Panel 24.
La figura 5 es el espectro de ..... del vapor de ....

* * * * *

emisión
mercurio

39. Por razones evidentes los espectros de emisión también se llaman espectros de líneas ..... Los espectros de absorción a menudo se llaman espectros de líneas ....., por una razón tan justa como obvia.

* * * * *

brillantes
obscuras

40.

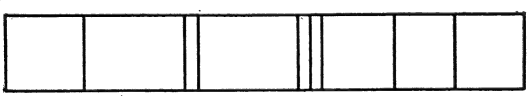


Fig. 1

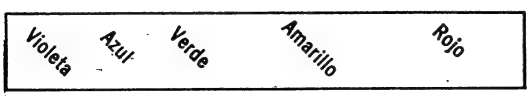


Fig. 2

La figura 1 es el espectro de líneas brillantes de un gas incandescente a baja presión. La figura 2 es un espectro continuo. Dibuje en esta figura el espectro de líneas obscuras del gas de la figura 1.

* * * * *

Para cada línea brillante de la Fig. 1 hay una línea obscura correspondiente en la Fig. 2.

41. Por una rejilla de difracción se hace pasar la luz del Sol; el espectro que se produce debe ser ....., puesto que la luz del Sol es luz blanca policromática.

* * * * *

continuo

42. Panel 24.

La figura 7 es el espectro de la luz del Sol y se llama comúnmente espectro solar; (es/no es) continuo en la misma forma que lo es el de la Fig. 1.

* * * * *

no es (el espectro de la Fig. 1 no tiene líneas obscuras)

43. Panel 24.

El espectro solar tiene muchas líneas ..... llamadas *líneas de Fraunhofer* en memoria de su descubridor. Observando con atención, el espectro solar es tan semejante a uno de ..... como a uno continuo.

* * * * *

obscuras
absorción

44. Las líneas de Fraunhofer son líneas (brillantes/obscuras) del espectro .....

* * * * *

obscuras
solar

45. El Sol está formado de gases. El fondo continuo del espectro solar indica que algunos de estos gases están ..... a ..... presión. Las líneas de Fraunhofer en el espectro solar indican que debe haber gases en la atmósfera del Sol, que no están ....

* * * * *

incandescentes
alta
incandescentes

46. Comparando las líneas de F..... con los espectros de líneas ..... de substancias en la Tierra, podemos identificar gases en la atmósfera del Sol.

* * * * *

Fraunhofer
brillantes *u* obscuras

Sección 5. Repaso y problemas

1. El funcionamiento de la rejilla de difracción resulta del hecho de que la naturaleza de la luz es (ondulatoria/corpuscular).

* * * * *

ondulatoria

2. La teoría corpuscular de la luz supone que ésta se compone de ... . *(complete).*

* * * * *

pequeñas partículas moviéndose muy rápidamente

3. ¿Cuáles de los siguientes conceptos son relativamente fáciles de explicar mediante la teoría corpuscular?

(a) la presión luminosa
(b) la difracción
(c) la reflexión
(d) la refracción
(e) el experimento de interferencia de Young de la doble rendija

* * * * *

(a), (c)

4. La difracción de las ondas en el agua se explica claramente mediante (la teoría corpuscular/la teoría ondulatoria de la luz/el principio de Huyghens).

* * * * *

el principio de Huyghens

5. El orden de magnitud (potencia de diez) correspondiente a la longitud de onda de las ondas de luz es de ..... metro.

* * * * *

10^{-7}

6. La luz cuya longitud de onda es de 4.5×10^{-7} m tiene una longitud de onda de ..... unidades Angstrom.

* * * * *

4500

7. En el experimento de Young de la doble rendija, sean: L = distancia entre las rendijas y la pantalla sobre la que se observa el patrón de interferencia, x = distancia aproximada entre líneas brillantes adyacentes del patrón, y d = separación entre las rendijas.

Escriba una ecuación para la longitud de onda, λ, de la luz incidente, en función de L, x y d.

* * * * *

$$\lambda = \frac{xd}{L}$$

8. La luz cuya longitud de onda es de 6000 unidades Angstrom tiene una frecuencia de ..... ciclos/s.

* * * * *

5×10^{14}

9. Sobre una rendija doble incide luz monocromática; la separación entre las rendijas es de 0.10 cm y la distancia entre franjas brillantes adyacentes en una pantalla que está a 5 m de distancia es de 0.30 cm. Calcule la longitud de onda (en cm) de la luz monocromática.

* * * * *

$$\lambda = \frac{xd}{L}$$

$$\lambda = \frac{(0.30 \text{ cm})\,(0.10 \text{ cm})}{500 \text{ cm}} = 6.0 \times 10^{-5} \text{ cm}$$

10. Hemos estudiado dos dispositivos que nos permiten descomponer la luz policromática en sus colores componentes; éstos son el .....
y la .....

* * * * *

prisma (o prisma de vidrio flint)
rejilla de difracción

11. Para dispersar la luz policromática podemos usar el prisma de vidrio flint, porque en este material las luces de diferentes colores se propagan con (la misma rapidez/diferente rapidez), no obstante que en el vacío se propagan con (la misma rapidez/diferente rapidez).

* * * * *

diferente rapidez
la misma rapidez

12. Para dispersar la luz policromática podemos buscar la rejilla de difracción, porque cada color monocromático tiene determinada .... de ..... y la distancia entre franjas brillantes en un patrón de interferencia es (directamente/inversamente) proporcional a la ..... de ..... de la luz empleada.

* * * * *

longitud (de) onda
directamente
longitud (de) ~~onda~~

13. El fondo de un espectro solar es un espectro ....., pero interrumpido por líneas .....

* * * * *

continuo
obscuras

14. Las líneas obscuras del espectro solar se llaman líneas de .... y representan los espectros de ..... de gases (incandescentes/no incandescentes) presentes en la atmósfera del Sol.

* * * * *

Fraunhofer
absorción
no incandescentes

15. Asocie cada uno de los siguientes conceptos con un espectro, ya sea continuo, de emisión o de absorción:

(1) un trozo de carbón incandescente (sólido).
(2) vapor de sodio calentado hasta la incandescencia, a alta presión.
(3) vapor de mercurio no incandescente, a través del cual esté pasando luz blanca.
(4) gas de mercurio incandescente, a baja presión.
(5) gas de hidrógeno en el centro del Sol.

* * * * *

(1) continuo
(2) continuo
(3) de absorción
(4) de emisión
(5) continuo

16. Refirámonos al panel 24.
¿Qué figura(s) representa(n) espectros de emisión?
¿Qué figura(s) representa(n) espectros continuos?
¿Qué figura(s) representa(n) espectros de absorción?
2, 3, 5, 8
1 y 7 (el 7 también se puede considerar como espectro de absorción).
4, 6, 7 (el 7 también se puede considerar como espectro continuo).

PROBLEMAS:

1. La teoría corpuscular (o de partícula) de la luz de Newton incluyó la idea de que la rapidez de las partículas de luz aumentaba al aumentar la densidad del medio de propagación. Explique cómo afectaría esto a la refracción.

2. Explique por qué la teoría corpuscular no puede explicar la difracción.

3. ¿En qué forma de la presión luminosa puede inferirse tanto la naturaleza corpuscular así como la ondulatoria de la luz?

4. Use el principio de Huyghens para explicar la difracción en una doble rendija.

5. Mediante un diagrama indique cuándo tiene lugar la interferencia constructiva y cuándo la destructiva en la difracción que sufren las ondas al pasar por una rendija doble.

6. ¿Por qué no se difracta la luz al pasar por una ventana transparente?

7. Si una fuente de luz amarilla produce interferencia al pasar por un par de rendijas angostas que están a 10^{-2} cm una de la otra, ¿dónde debe colocarse la pantalla para que usted vea las franjas del patrón de interferencia a 1 cm una de la otra?

8. Si empleamos dos rendijas separadas por una distancia de 0.01 cm y hacemos pasar por ellas una luz monocromática con una distancia a la pantalla de 0.4 metro y con una distancia de 1 mm entre el máximo central y la siguiente línea, ¿cuál es la longitud de onda de la luz monocromática?

9. Empleando dos rendijas, ¿cómo demostraría usted que la longitud de onda de la luz roja visible es casi el doble de la del violeta visible?

10. ¿Cuál es la frecuencia de la luz monocromática amarilla?, ¿cuál es su longitud de onda en Angstroms y en centímetros?

11. ¿Cuál es la frecuencia de la luz monocromática verde? ¿cuál es su longitud de onda en Angstroms y en centímetros?

12. ¿Cuál es la distancia entre las rendijas en una rejilla de difracción que tiene 5280 líneas por cm?

13. Explique cómo produce la rejilla de difracción un espectro continuo.

14. ¿En qué orden (matemático) están colocados los colores en un patrón de difracción producido con una rejilla?

15. En la producción de un espectro de luz policromática compare el funcionamiento de un prisma de vidrio transparente con el de una rejilla de difracción.

16. Describa la clase de fuente de luz que al difractarse produce un espectro continuo.

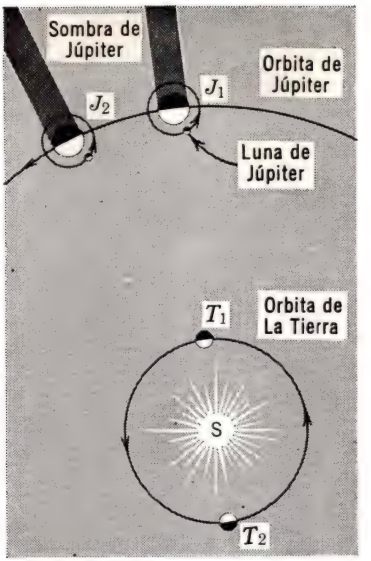
17. ¿Cómo sabemos que en el Sol hay gases incandescentes?

18. ¿Cuál es la diferencia entre un espectro continuo y uno de absorción?

19. ¿Qué nos dicen las líneas de Fraunhofer acerca del espectro del Sol?

20. Suponga que la distancia aproximada entre franjas brillantes adyacentes en un patrón de interferencia producido mediante el experimento de Young de la rendija doble es de 4.0×10^{-3} m, y que la distancia entre rendijas es de 1.6×10^{-4} m. Si la distancia de las rendijas a la pantalla es de 1.2 m, ¿cuál es la longitud de onda de la luz monocromática que se está estudiando?

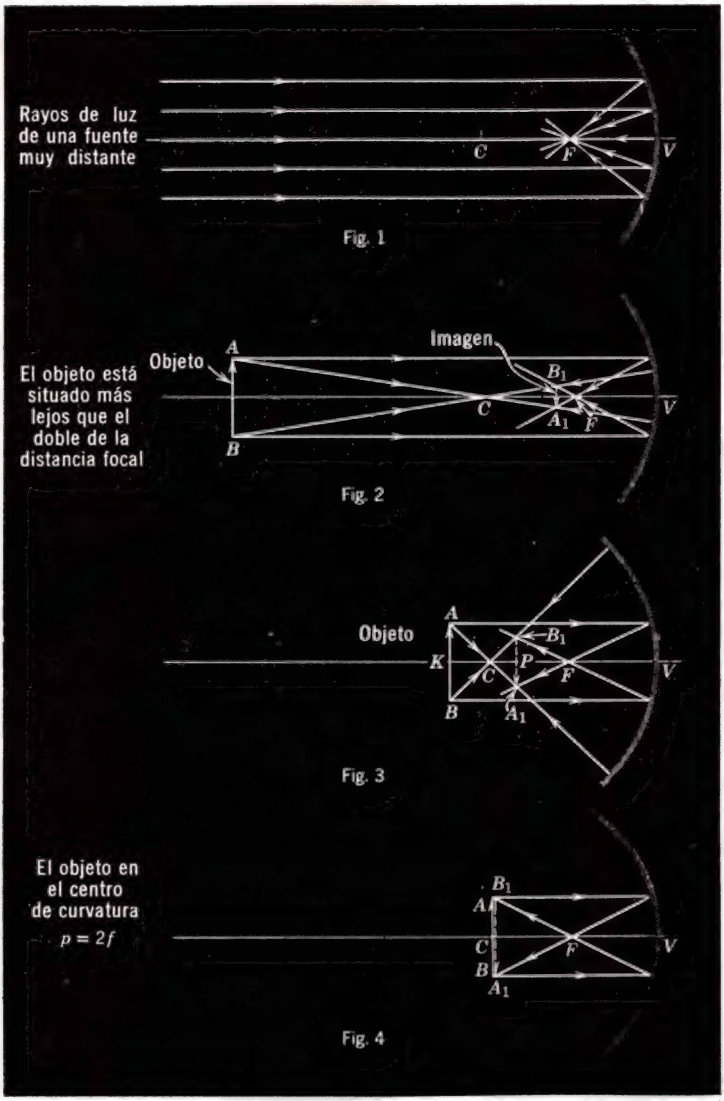
Panel 1

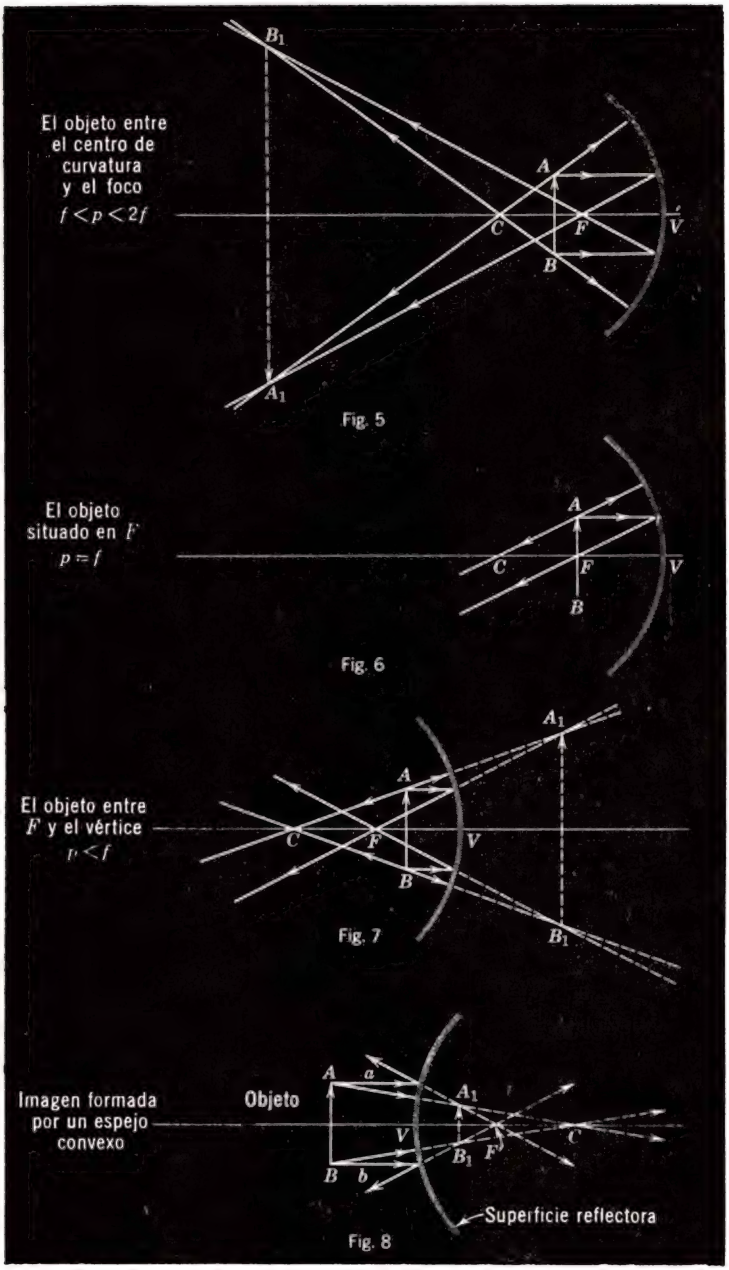


El astrónomo danés Roemer midió la rapidez de propagación de la luz en 1675. Observe que cuando la Tierra está en la posición T_1 de su órbita, y Júpiter en la posición J_1 de la suya, la distancia entre los dos planetas es mínima. Seis meses después la Tierra se ha desplazado a T_2 y Júpiter a J_2.

En T_1, el intervalo que se observa entre eclipses de una de las lunas de Júpiter es de 42.5 horas. Basándose en estos datos, Roemer hizo predicciones de los tiempos y fechas exactas en que esta luna entraría en la sombra de Júpiter (es decir, sería eclipsada). Sus predicciones fueron relativamente exactas a corto plazo, pero, a medida que la Tierra se movía hacia T_2 fueron perdiendo precisión. En T_2, Roemer descubrió que su predicción, basada en el intervalo entre eclipses observados en T_1, se había adelantado en 1000 segundos. En otras palabras, el error en su predicción fue de 1000 seg. Entonces Roemer observó que a medida que la Tierra continuaba en su órbita, de nuevo hacia T_1, el error iba disminuyendo hasta ser una vez más nulo al llegar la Tierra de nuevo a T_1.

Panel 2


Rayos de luz de una fuente muy distante
C
F
V
Fig. 1
El objeto está situado más lejos que el doble de la distancia focal
Objeto
A
B
Imagen
B1
A1
C
F
V
Fig. 2
Objeto
A
B
K
C
P
B1
A1
F
V
Fig. 3
El objeto en el centro de curvatura
p = 2f
B1
A
C
B
A1
F
V
Fig. 4


El objeto entre el centro de curvatura y el foco
$f < p < 2f$
B_1
A
C
F
V
B
A_1
Fig. 5
El objeto situado en F
$p = f$
A
C
F
V
B
Fig. 6
El objeto entre F y el vértice
$p < f$
A_1
A
C
F
V
B
B_1
Fig. 7
Imagen formada por un espejo convexo
Objeto
A
a'
A_1
V
B_1
F'
C
B
b
Superficie reflectora
Fig. 8

Panel 3

FUNCIONES TRIGONOMETRICAS *(naturales).*

Angulo	*Seno*	*Coseno*	*Tangente*	*Angulo*	*Seno*	*Coseno*	*Tangente*
0°	0.000	1.000	0.000				
1°	.018	1.000	.018	46°	.719	.695	1.036
2°	.035	0.999	.035	47°	.731	.682	1.072
3°	.052	.999	.052	48°	.743	.669	1.111
4°	.070	.998	.070	49°	.755	.656	1.150
5°	.087	.996	.088	50°	.766	.643	1.192
6°	.105	.995	.105	31°	.777	.629	1.235
7°	.122	.993	.123	52°	.778	.616	1.280
8°	.139	.990	.141	53°	.799	.602	1.327
9°	.156	.988	.158	54°	.809	.588	1.376
10°	.174	.985	.176	55°	.819	.574	1.428
11°	.191	.982	.194	56°	.829	.559	1.483
12°	.208	.978	.213	57°	.839	.545	1.540
13°	.225	.974	.231	58°	.848	.530	1.600
14°	.242	.970	.249	59°	.857	.515	1.664
15°	.259	.966	.268	60°	.866	.500	1.732
16°	.276	.961	.287	61°	.875	.485	1.804
17°	.292	.956	.306	62°	.883	.470	1.881
18°	.309	.951	.325	63°	.891	.454	1.963
19°	.326	.946	.344	64°	.899	.438	2.050
20°	.342	.940	.364	65°	.906	.423	2.145
21°	.358	.934	.384	66°	.914	.407	2.246
22°	.375	.927	.404	67°	.921	.391	2.356
23°	.391	.921	.425	68°	.927	.375	2.475
24°	.407	.914	.445	69°	.934	.358	2.605
25°	.423	.906	.466	70°	.940	.342	2.747
26°	.438	.899	.488	71°	.946	.326	2.904
27°	.454	.891	.510	72°	.951	.309	3.078
28°	.470	.883	.532	73°	.956	.292	3.271
29°	.485	.875	.554	74°	.961	.276	3.487
30°	.500	.866	.577	75°	.966	.259	3.732
31°	.515	.857	.601	76°	.970	.242	4.011
32°	.530	.848	.625	77°	.974	.225	4.331
33°	.545	.839	.649	78°	.978	.208	4.705
34°	.559	.829	.675	79°	.982	.191	5.145
35°	.574	.819	.700	80°	.985	.174	5.671
36°	.588	.809	.727	81°	.988	.156	6.314
37°	.602	.799	.754	82°	.990	.139	7.115
38°	.616	.788	.781	83°	.993	.122	8.144
39°	.629	.777	.810	84°	.995	.105	9.514
40°	.643	.766	.839	85°	.996	.087	11.43
41°	.656	.755	.869	86°	.998	.070	14.30
42°	.669	.743	.900	87°	.999	.052	19.08
43°	.682	.731	.933	88°	.999	.035	28.64
44°	.595	.719	.966	89°	1.000	.018	57.29
45°	.707	.707	1.000	90°	1.000	.000	∞

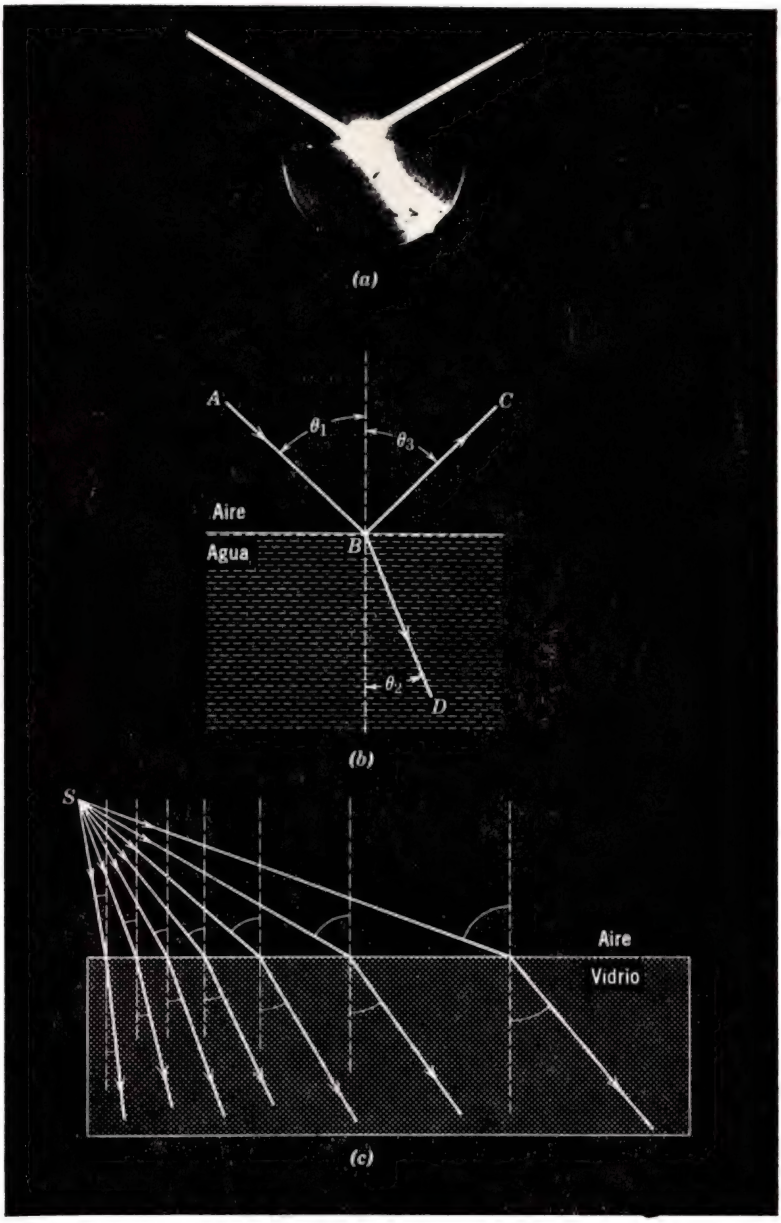
Panel 4

Fig. (*d*)

I Angulo de incidencia (θ_1) (en grados)	II Angulo de refracción (θ_2) (en grados)	III $\frac{\theta_1}{\theta_2}$	IV $\frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2}$
10	6.7		
20	13		
30	20		
40	25		
50	31		
60	35		
70	39		

Fig. (*e*) Algunos índices absolutos de refracción

Aire (a 1 atm; 20°C)	1.0003
Agua	1.33
Vidrio crown	1.52
Vidrio flint	1.66
Diamante	2.42
Cuarzo fundido	1.46
Cuarzo cristal	1.54
Alcohol etílico	1.36
Glicerina	1.47



La figura *(a)* es una fotografía de la reflexión y la refracción de un haz de luz que proviene del aire y toca la superficie del agua.

Panel 5

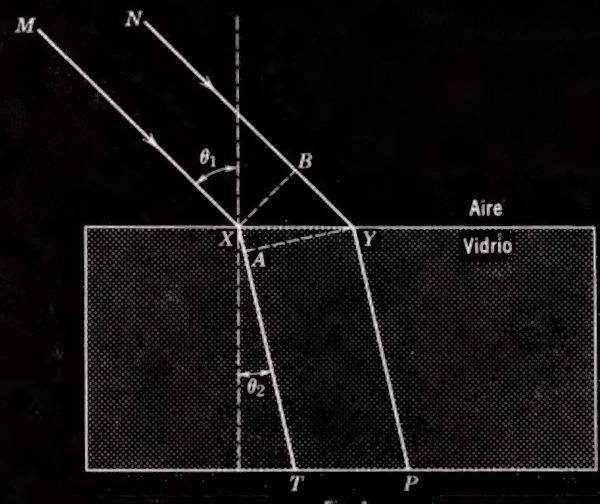


Fig. 1

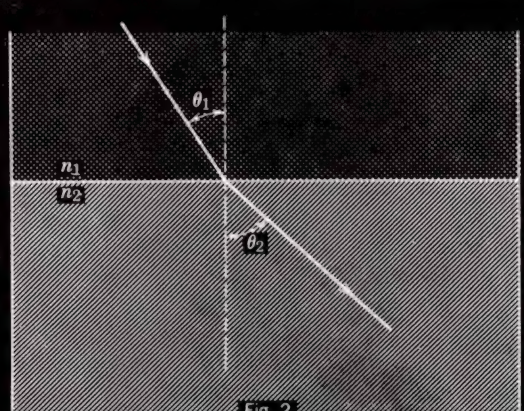


Fig. 2

Panel 6

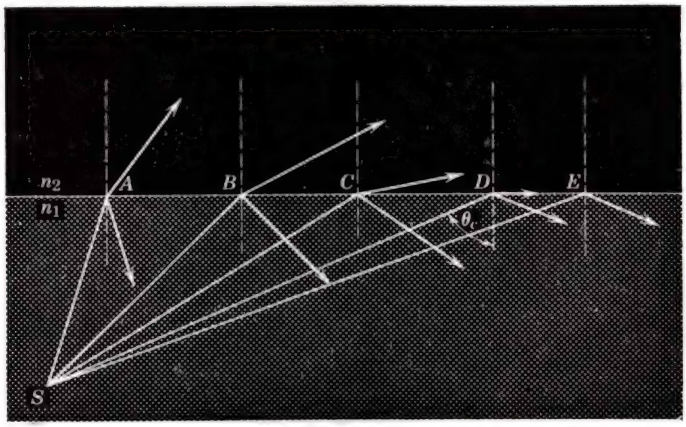


Fig. 1

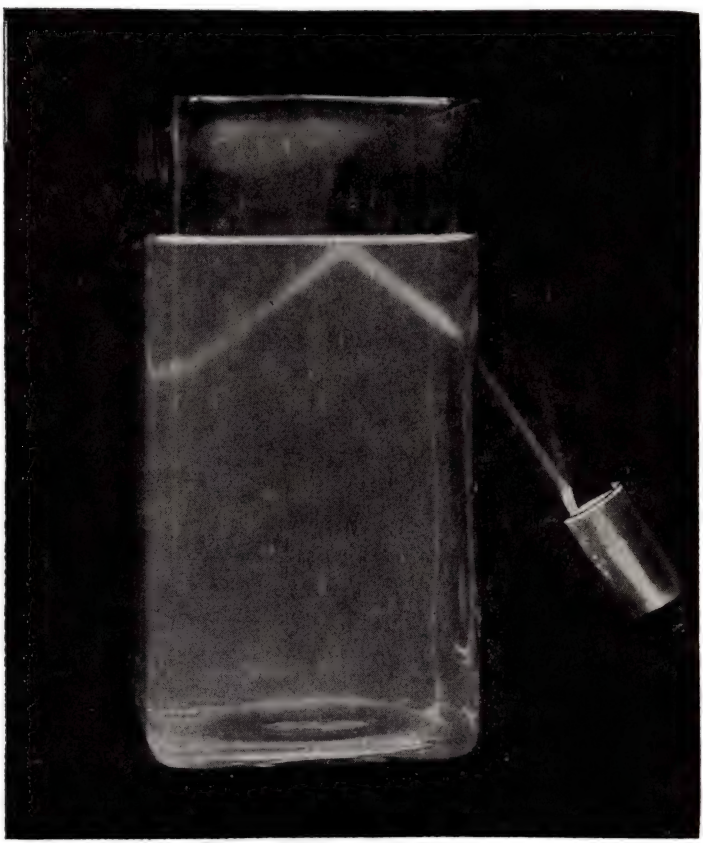


Fig. 2

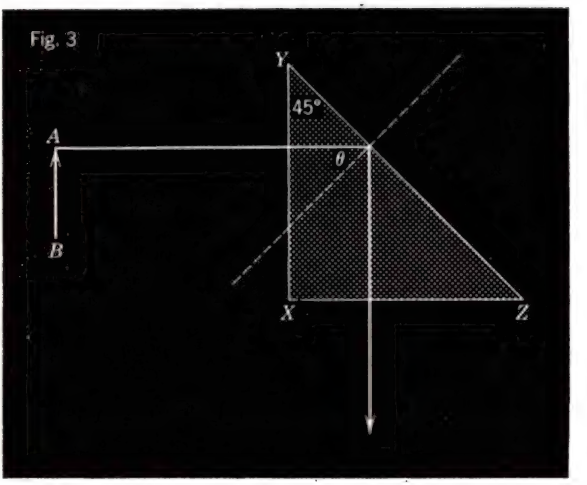


Fig. 3

Panel 7

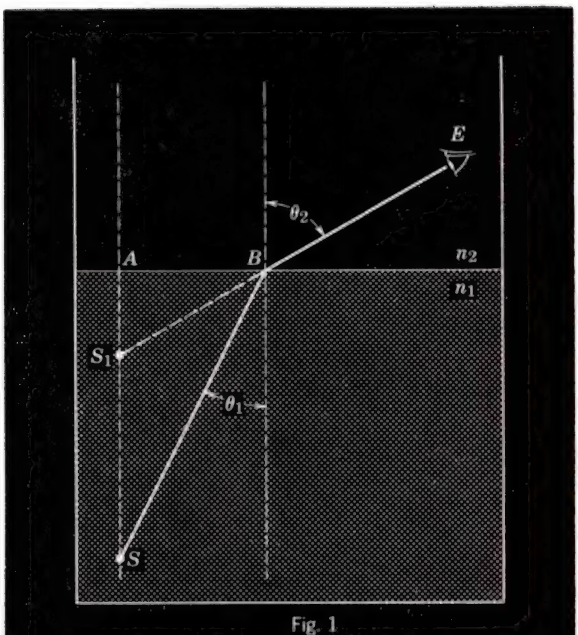


Fig. 1

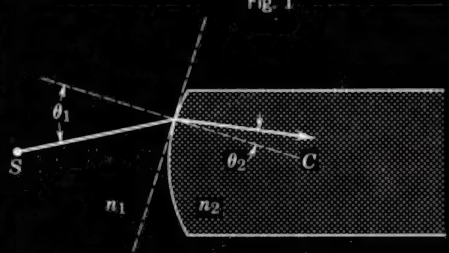


Fig. 2

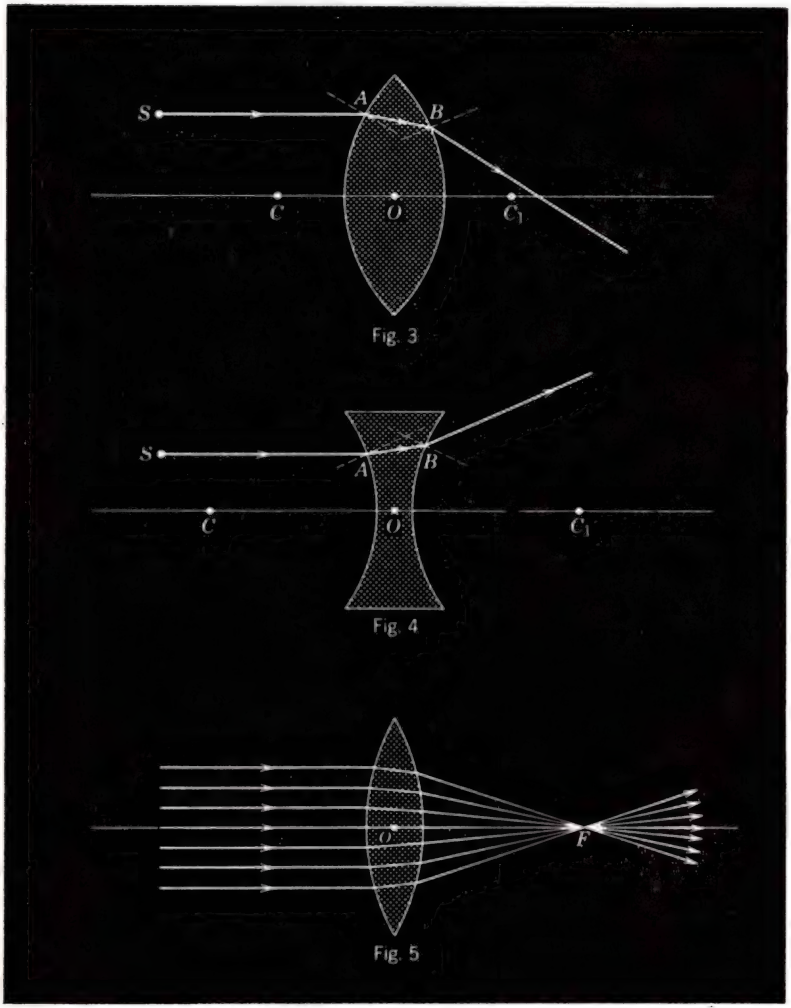


Fig. 6. Convenciones para los signos en la Fórmula del fabricante de lentes:

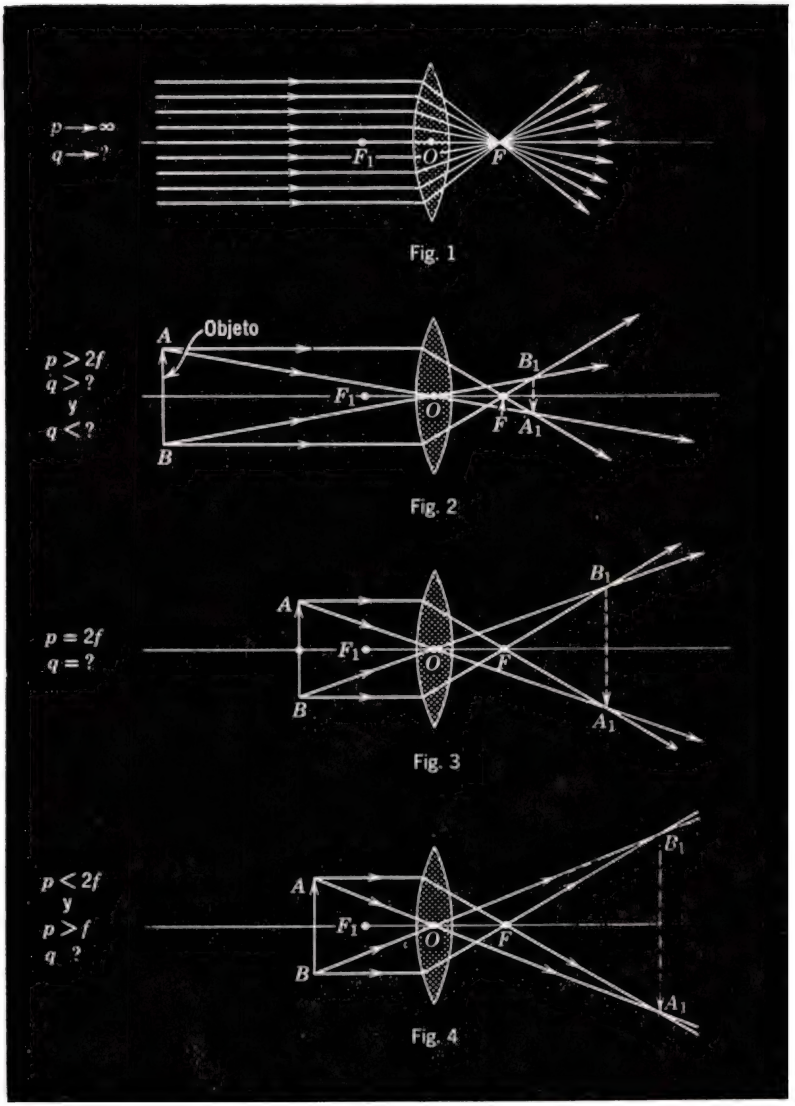
(1) Los rayos de luz que entran y pasan por una lente, se dibujan de izquierda a derecha.

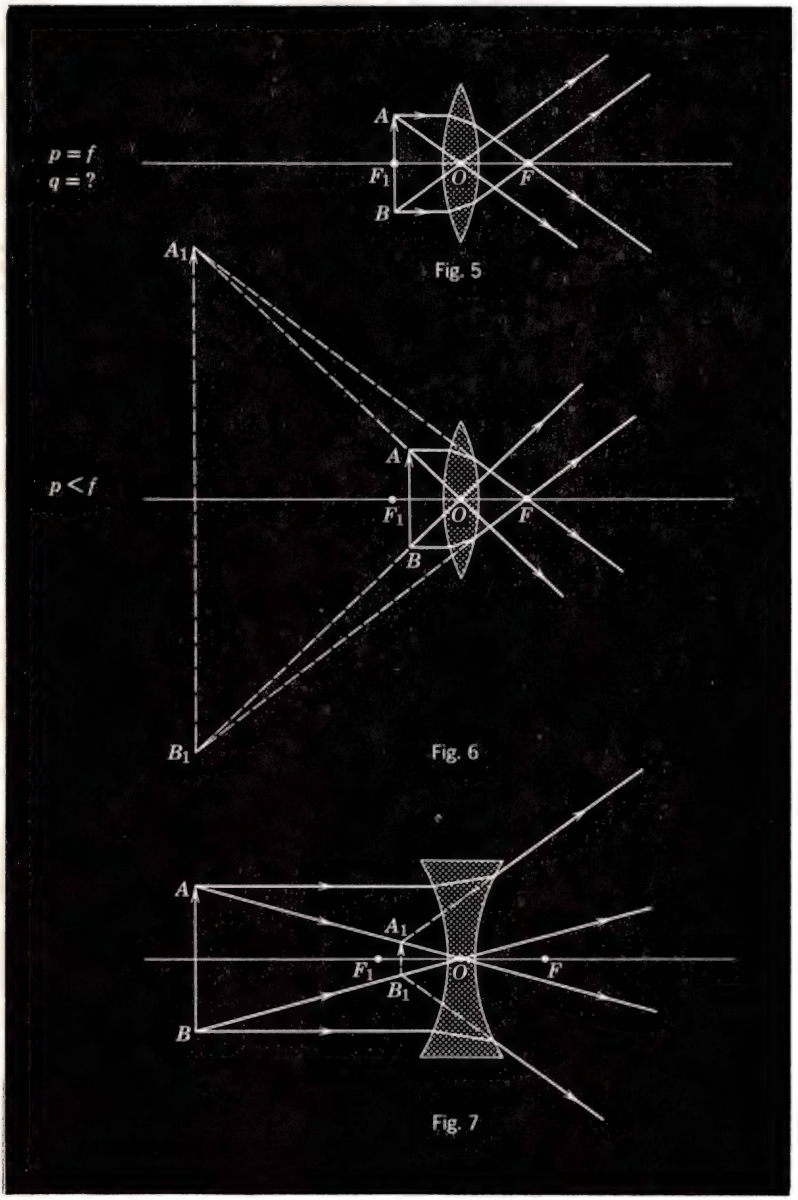
(2) Cuando un rayo de luz encuentra a una superficie convexa, el radio de curvatura de esa superficie es positivo (+).

(3) Cuando un rayo de luz encuentra a una superficie cóncava, el radio de curvatura de esa superficie es negativo (−).

(4) Cuando un rayo de luz encuentra una superficie plana, la curvatura $(1/r)$ es cero.

Panel 8


p → ∞
q → ?
F1
O
F
Fig. 1
p > 2f
q > ?
y
q < ?
A
Objeto
B
F1
O
F
B1
A1
Fig. 2
p = 2f
q = ?
A
B
F1
O
F
B1
A1
Fig. 3
p < 2f
y
p > f
q ?
A
B
F1
O
F
B1
A1
Fig. 4


p = f
q = ?
A
F1
O
F
B
Fig. 5
A1
p < f
A
F1
O
F
B
B1
Fig. 6
A
A1
F1
O
F
B1
B
Fig. 7

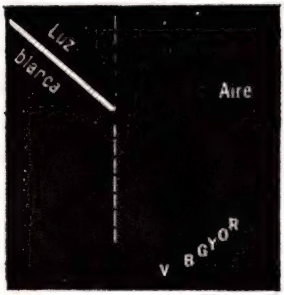


Fig. (a)

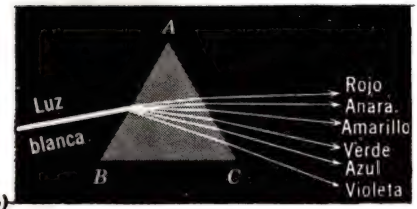


Fig. (b)

Fig. (c)

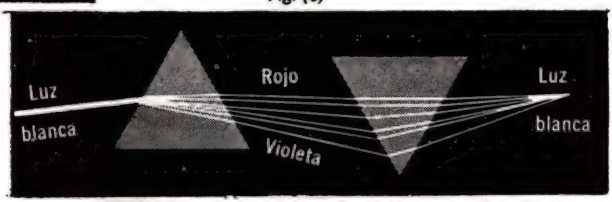


Fig. (d)

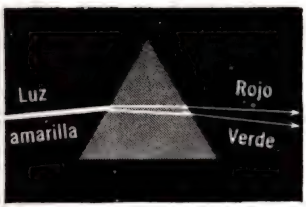


Fig. (e)

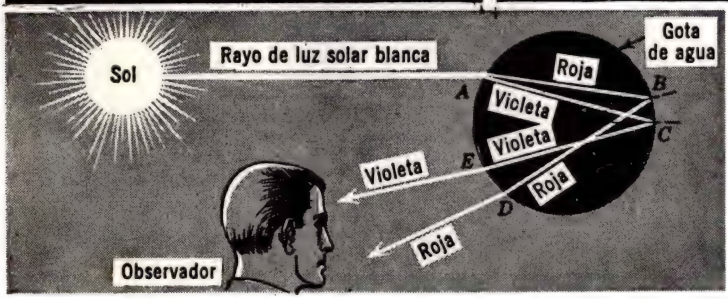


Fig. (f)

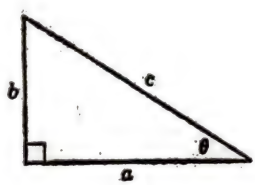


Fig. 1

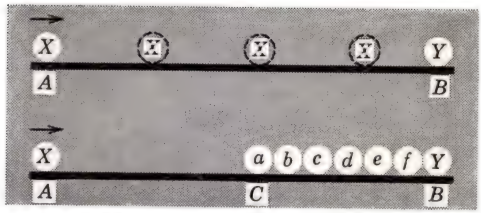


Fig. 2

Fig. 3

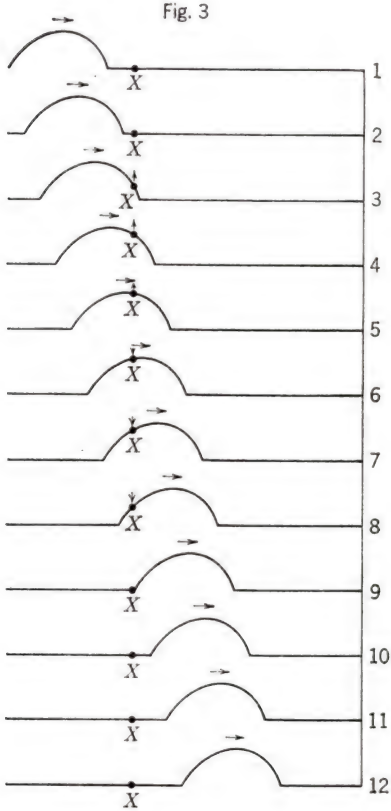


Fig. 4

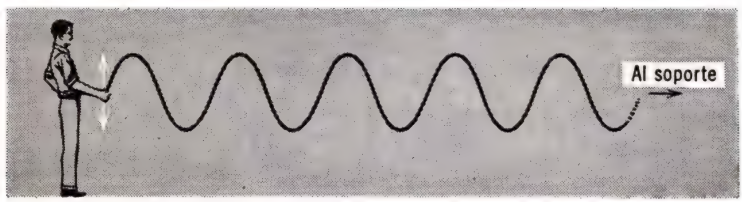
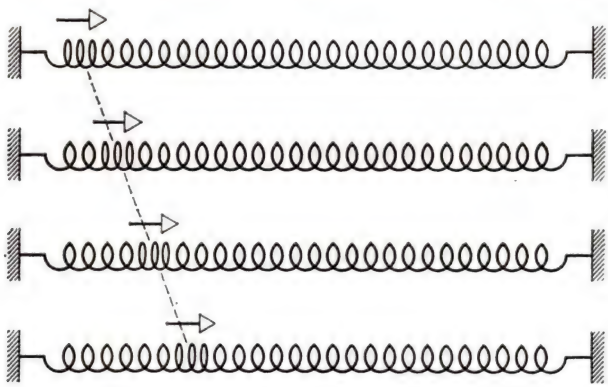
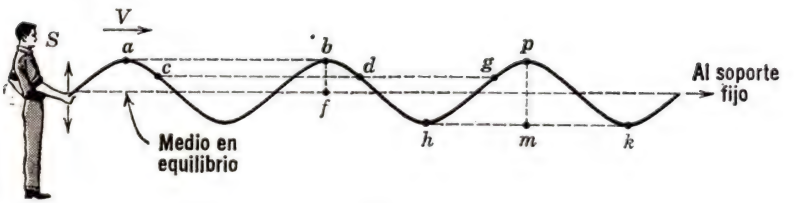


Fig. 5



Este es un ejemplo de pulso longitudinal. Observe que las partículas del medio (el resorte) se mueven en la misma dirección del pulso mismo. La compresión se mueve de izquierda a derecha.

Fig. 1


V
S
a
b
c
d
f
g
p
h
m
k
Al soporte fijo
Medio en equilibrio

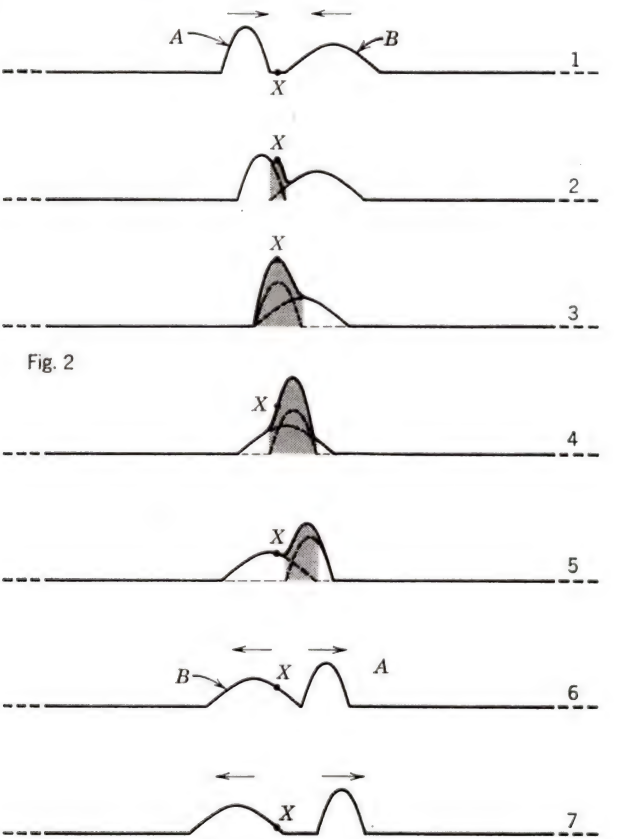

A
B
X
1
X
2
X
3

Fig. 2

X
4
X
5
B
X
A
6
X
7

Fig. 1

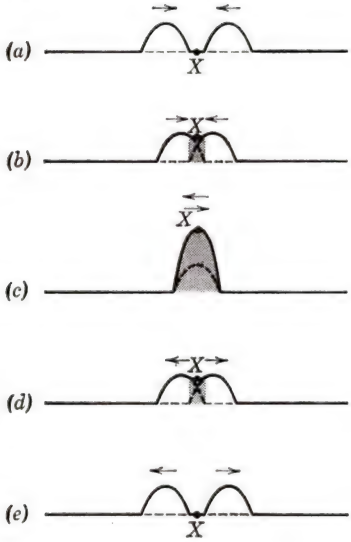


Fig. 2

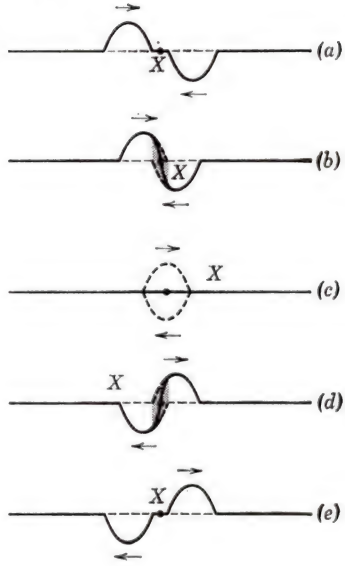


Fig. 3

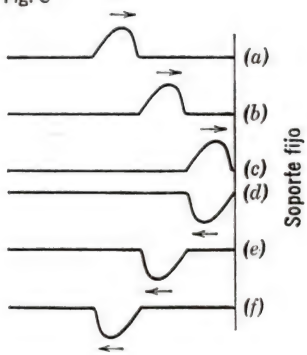
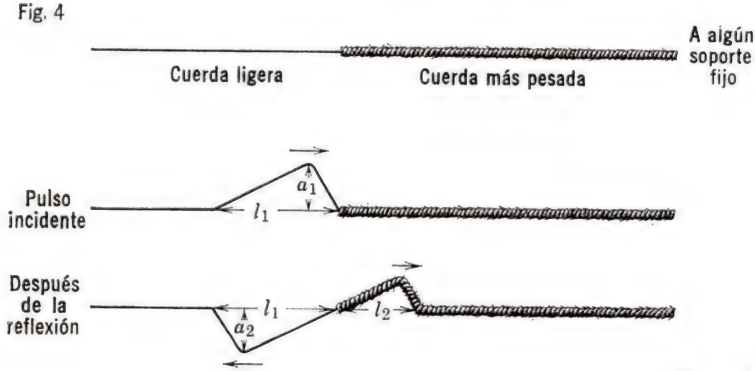


Fig. 4



Panel 12

Fig. 1

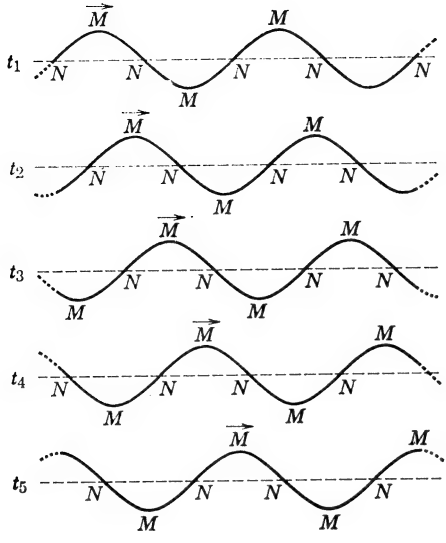


Fig. 2

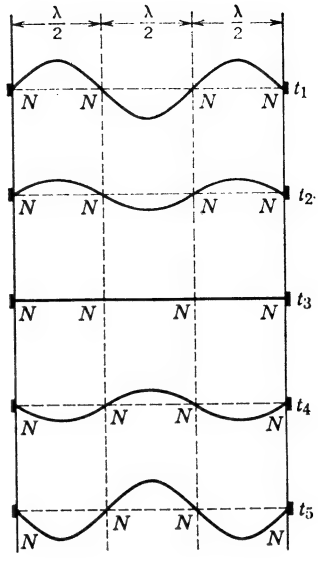


Fig. 3

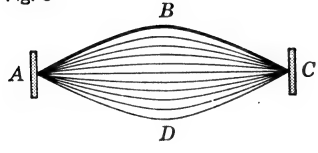


Fig. 4

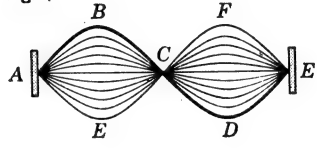


Fig. 1

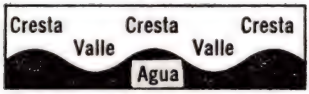
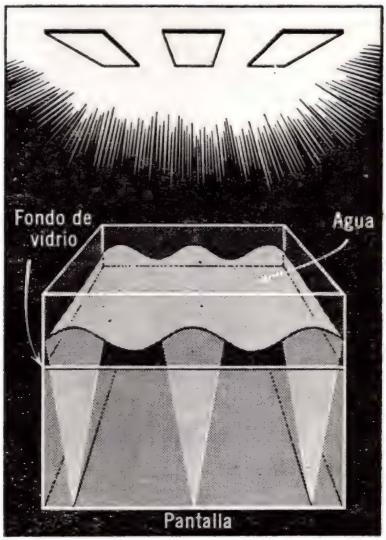
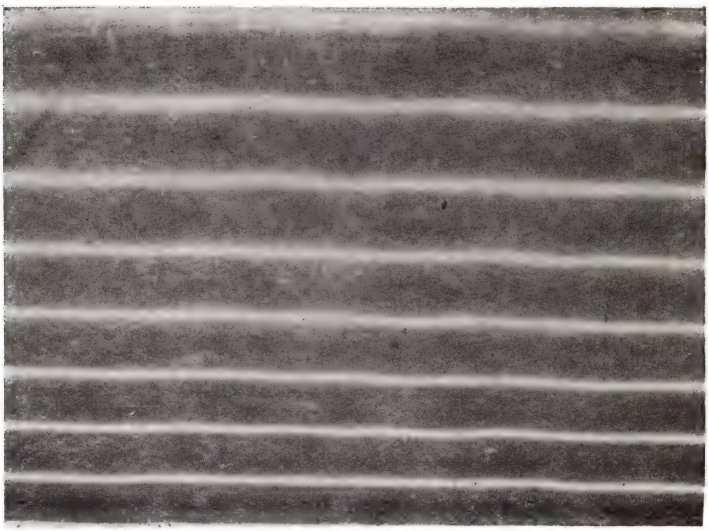


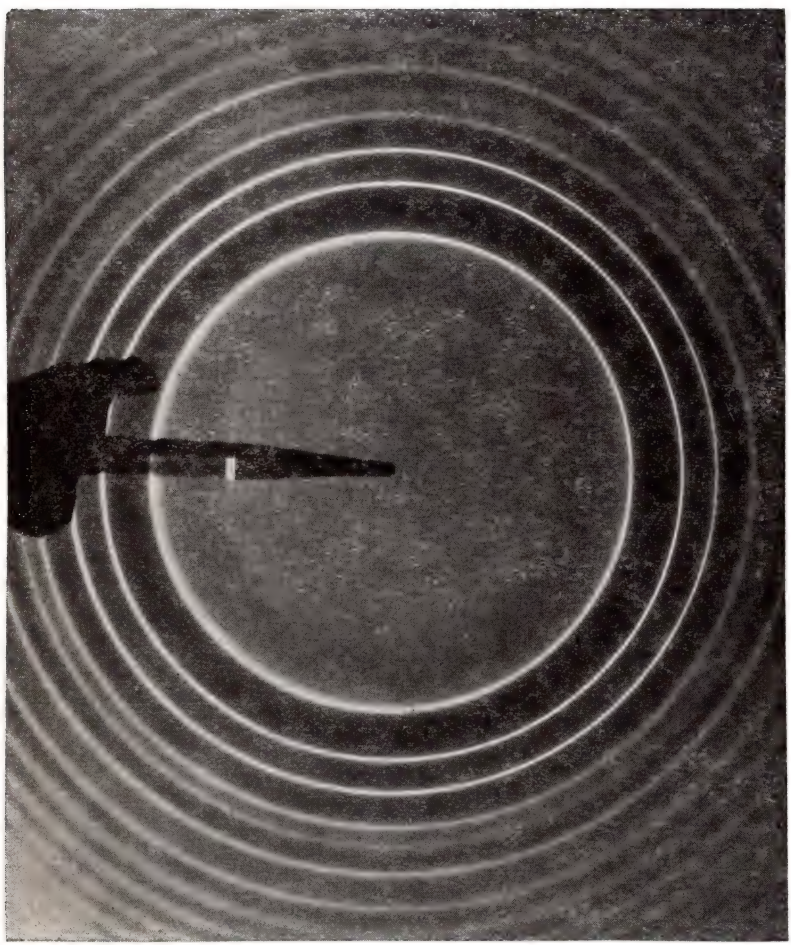
Fig. 2





Cortesía de Educational Services, Inc.

Fig. 3

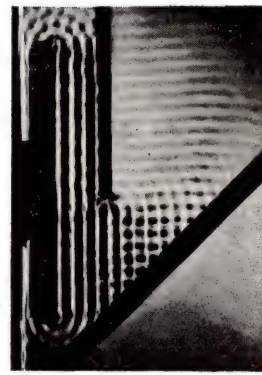


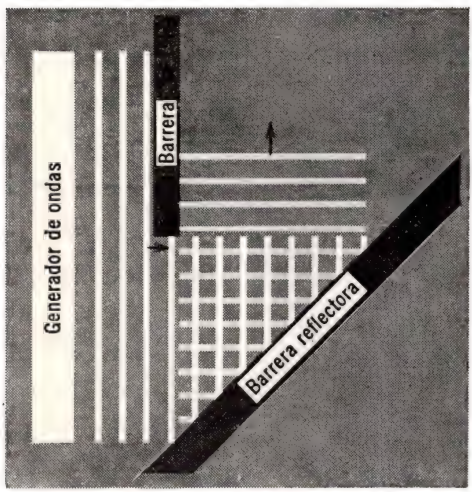
Cortesía de Educational Services, Inc.

Fig. 4

Fig. 1

Fig. 2





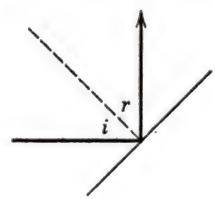
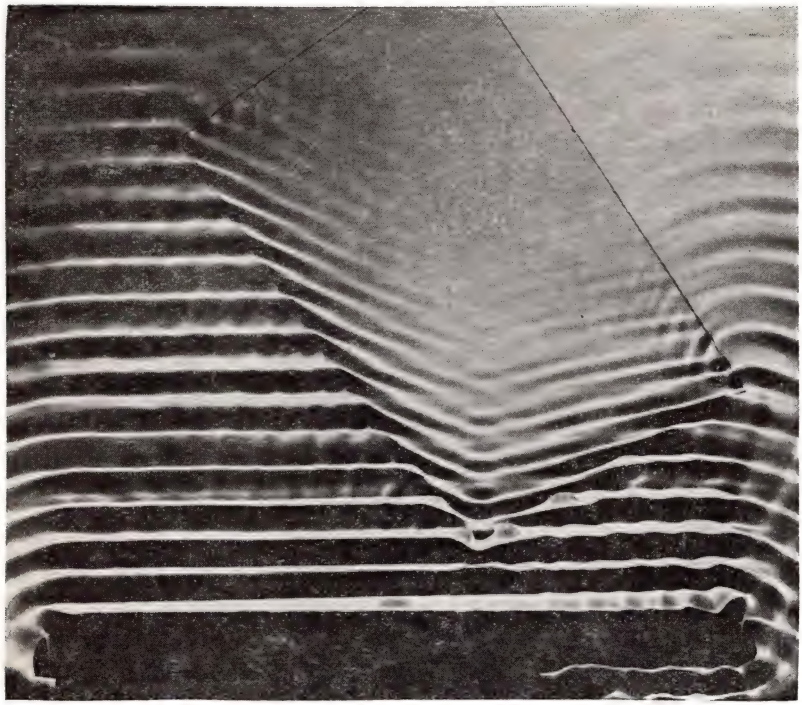


Fig. 3

Cortesía de Educational Services, Inc.



Cortesía de Educational Services, Inc.

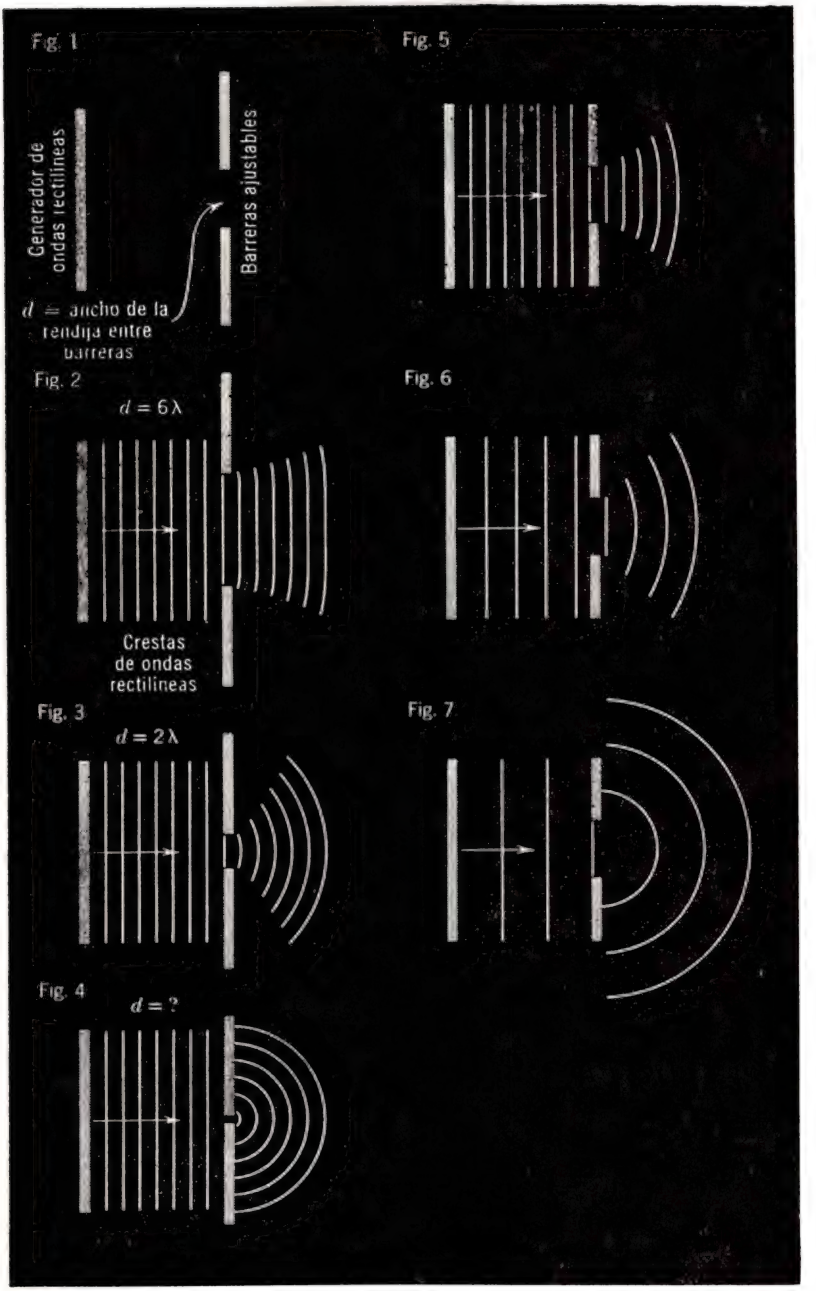


Fig. 1
Generador de ondas rectilíneas
Barreras ajustables
d = ancho de la rendija entre barreras
Fig. 2
$d = 6\lambda$
Crestas de ondas rectilíneas
Fig. 3
$d = 2\lambda$
Fig. 4
$d = ?$
Fig. 5
Fig. 6
Fig. 7

Panel 17

Fig. 1

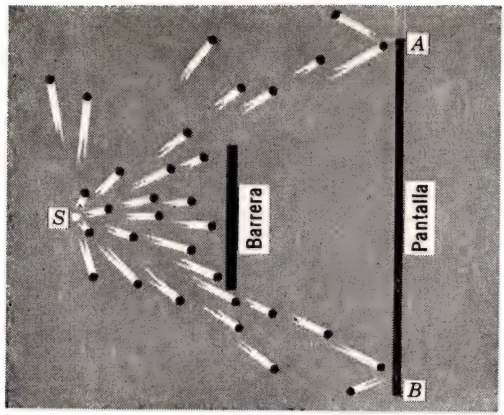
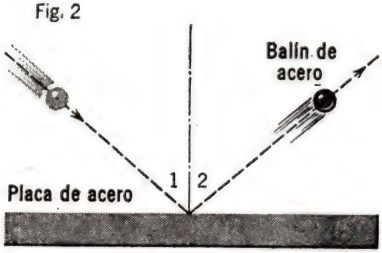


Fig. 2



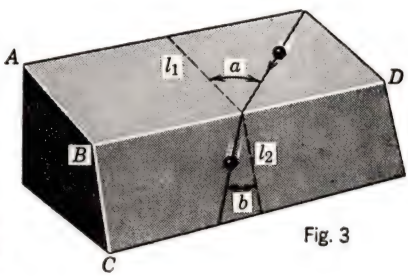


Fig. 3

Fig. 1

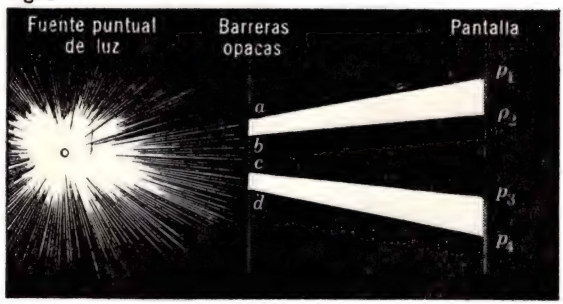
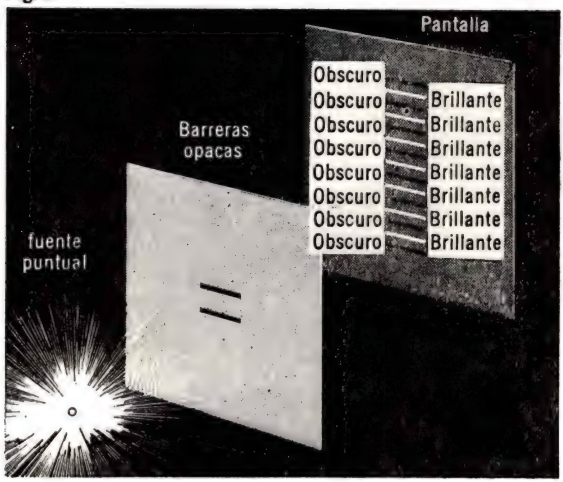
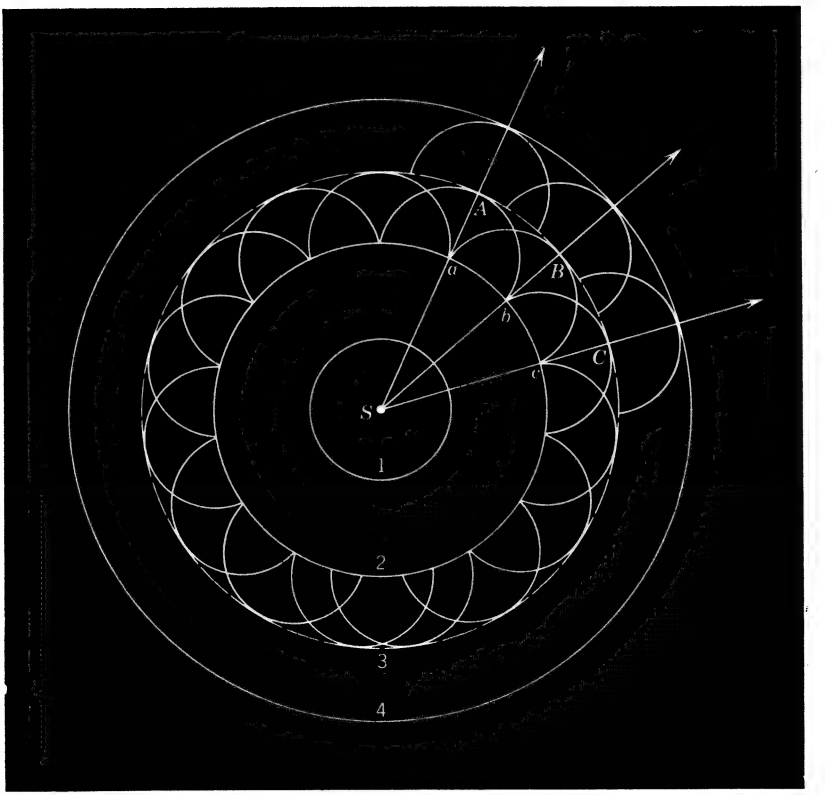

Fuente puntual de luz
Barreras opacas
Pantalla
a
b
c
d
p_1
p_2
p_3
p_4

Fig. 2


Pantalla
Barreras opacas
fuente puntual
Obscuro
Obscuro
Obscuro
Obscuro
Obscuro
Obscuro
Obscuro
Brillante
Brillante
Brillante
Brillante
Brillante
Brillante
Brillante



Esta es una onda circular en movimiento, representada conforme al principio de Huyghens. De acuerdo con este principio, cualquier punto de cualquier frente de onda (es decir, cualquier punto de las circunferencias 1, 2, 3, etc.) puede considerarse como una fuente de ondas circulares. Si cada punto *a, b, c,* etc., del frente de onda circular 2 actúa como una fuente puntual, las ondas secundarias se propagan simultáneamente como se muestra en la figura. La curva 3, que contiene a todas estas ondas secundarias, se llama *envolvente,* y representa un nuevo frente de onda al propagarse el pulso que comenzó en *S*. Las flechas indican cómo el pulso se aleja en todas direcciones.

Fig. 1

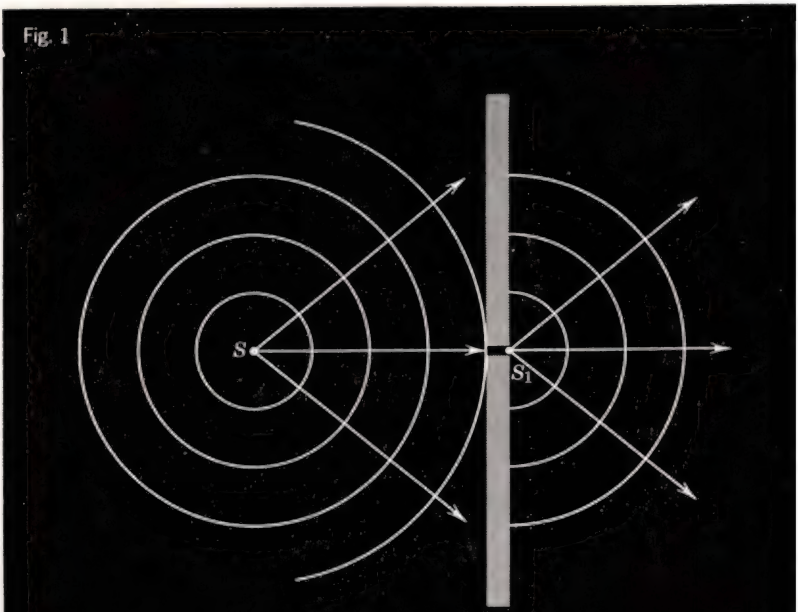
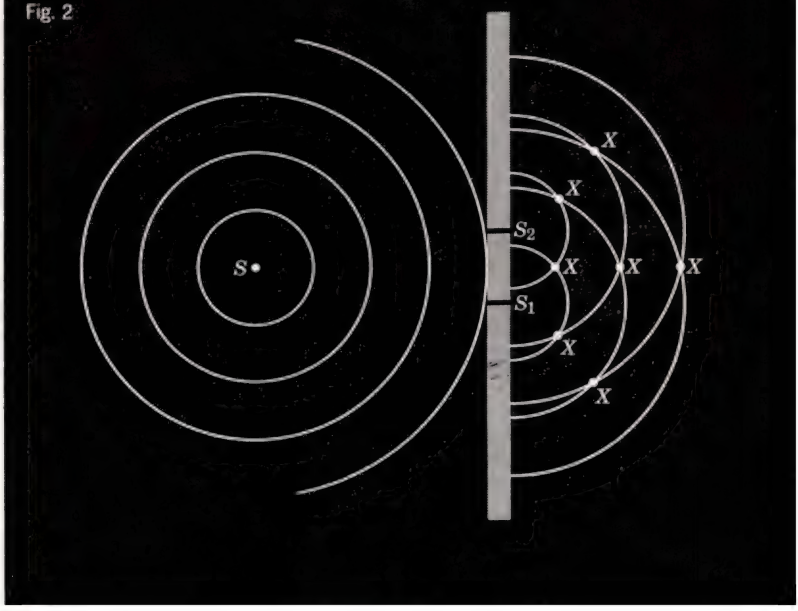


Fig. 2



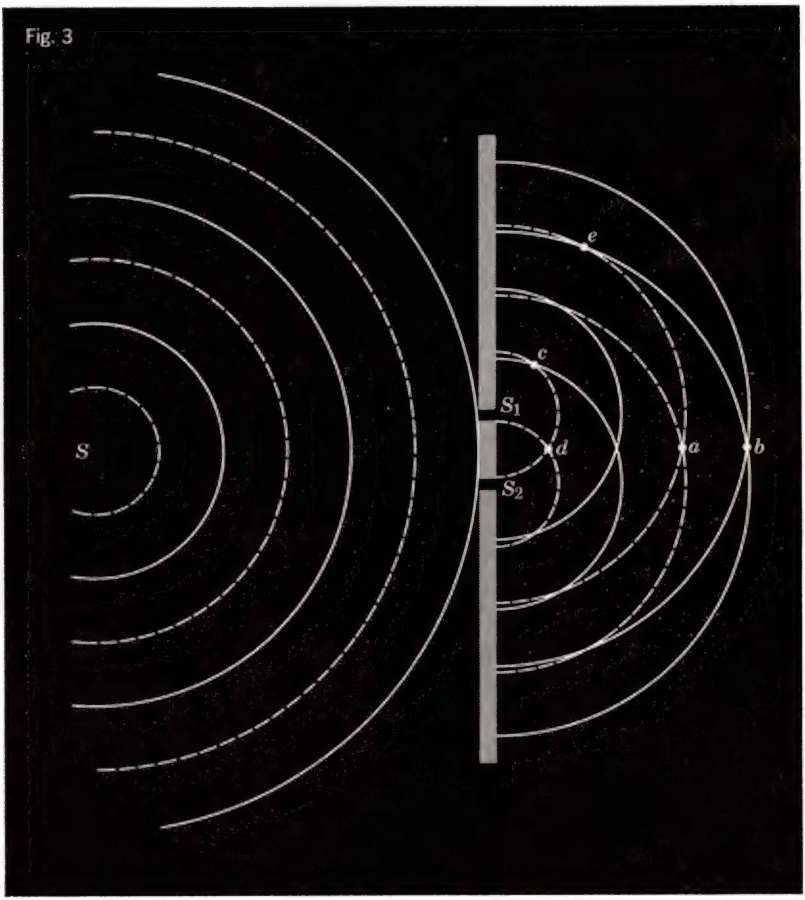
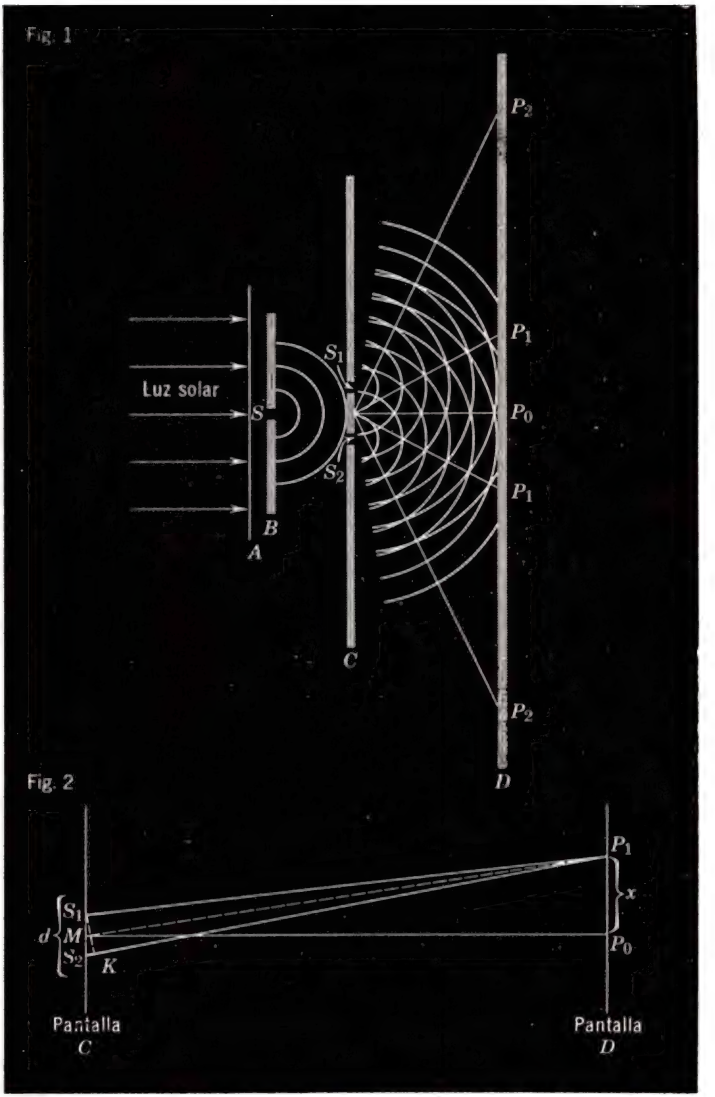


Fig. 3
S
S_1
S_2
e
c
d
a
b

Panel 22



El experimento de Young de la rendija doble

Se hace pasar la luz solar a través del filtro monocromático verde *A*. La luz verde pasa después a la pantalla *B* que tiene una pequeña rendija *S*, equidistante de las rendijas S_1 y S_2 de otra pantalla *C*. La luz de *S* pasa por S_1 y S_2 y, finalmente llega a la pantalla *D*, donde produce franjas (o bandas) brillantes rotuladas P_0, P_1, etc., separadas por regiones obscuras. Este diagrama *no* está dibujado a escala. Aproximadamente, las distancias son: 2×10^{-4} m entre S_1 y S_2, 2 metros entre las pantallas *C* y *D*, y 5×10^{-3} entre P_0 y P_1.

Fig. 1

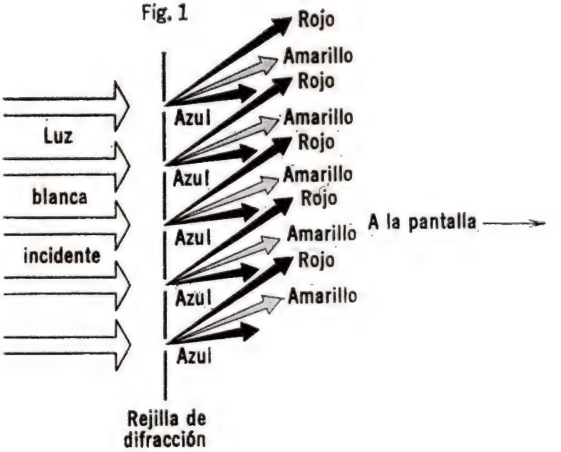

Rojo
Amarillo
Rojo
Azul
Amarillo
Rojo
Azul
Amarillo
Rojo
Azul
Amarillo
Rojo
Azul
Amarillo
Azul
Luz
blanca
incidente
A la pantalla
Rejilla de
difracción

Fig. 2

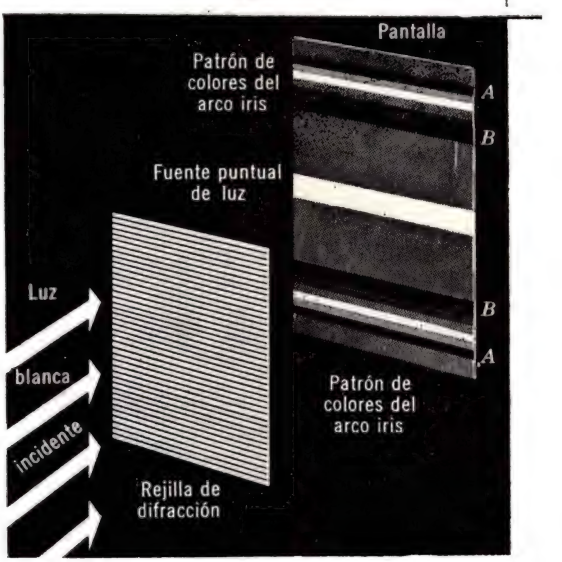

Pantalla
Patrón de
colores del
arco iris
A
B
Fuente puntual
de luz
B
A
Luz
blanca
incidente
Patrón de
colores del
arco iris
Rejilla de
difracción

Fig. 1

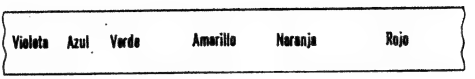
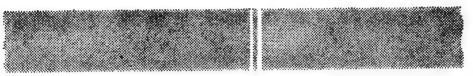
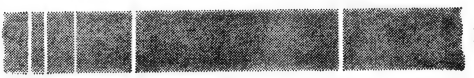


Fig. 2



Gas de sodio

Fig. 3



Hidrógeno

Fig. 4

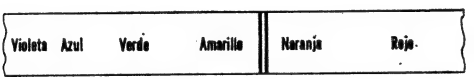
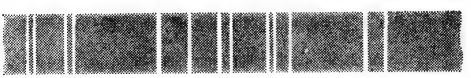


Fig. 5



Mercurio

Fig. 6

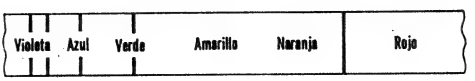
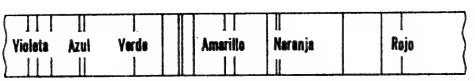
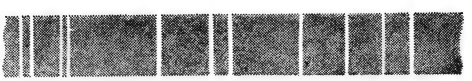


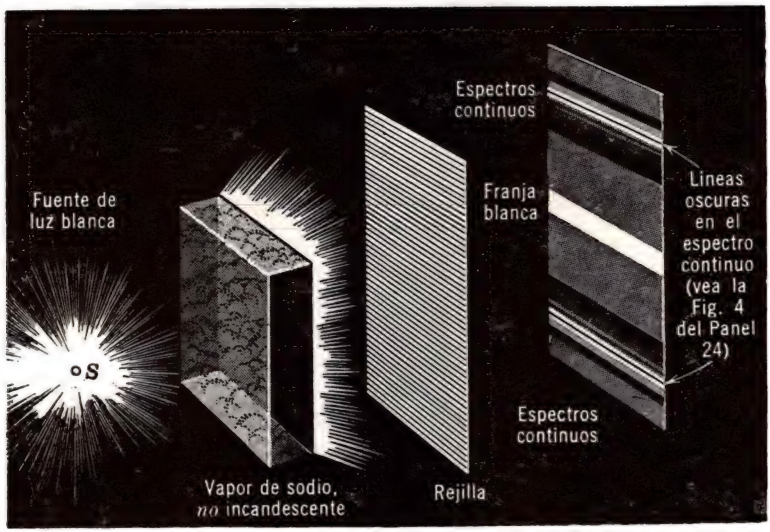
Fig. 7



Espectro solar

Fig. 8





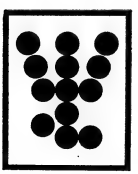
Producción de un espectro de absorción

Un sólido, líquido o gas incandescentes a alta presión, proporciona luz blanca en *S*. Esta luz se hace pasar a través de un recipiente transparente que contiene gas de sodio que *no* está incandescente y después por una rejilla de difracción, hasta una pantalla donde se muestra su espectro. El espectro producido por este arreglo consiste de algunas líneas obscuras sobre un espectro que en ausencia del sodio, sería continuo. Las líneas obscuras aparecen en las posiciones en que se encuentran las líneas brillantes cuando el gas está incandescente.

FISICA PROGRAMADA

Alexander Joseph y Daniel J. Leahy

VOLUMEN I: Mecánica
VOLUMEN II: Electricidad y Magnetismo
VOLUMEN III: Optica y Ondas
VOLUMEN IV: Teoría Cinética y Termodinámica
VOLUMEN V: Tópicos de Física Moderna



Serie Limusa Wiley de
LIBROS PROGRAMADOS

DIRECTOR

MELCHOR RODRIGUEZ CABALLERO

DOCTORADO EN INGENIERIA EN EL
INSTITUTO TECNOLOGICO DE MASSACHUSETTS

Versión autorizada en español de la 2ª edición original
en inglés, publicada por John Wiley & Sons,
Inc., N. Y., bajo el título
PROGRAMMED PHYSICS PART III: *Optics and Waves*

© 1965 JOHN WILEY & SONS, INC., N. Y.

Versión española:
DR. MELCHOR RODRIGUEZ CABALLERO
Profesor Titular de la División de Estudios Superiores
de la Facultad de Ingeniería de la
Universidad Nacional Autónoma de México.

Colaborador:
OSCAR WECKMANN MUÑOZ

Revisión:
DR. FRANCISCO MEDINA NICOLAU
Investigador del Instituto de Física de la
Universidad Nacional Autónoma de México
Asesor Técnico de la Comisión Nacional
de Energía Nuclear.

Derechos reservados en lengua española
© 1970, EDITORIAL LIMUSA-WILEY, S. A.
Arcos de Belem Núm. 75, México 1, D. F.
Miembro de la Cámara Nacional de la
Industria Editorial, Registro Núm. 121.

Primera edición: 1970

Impreso en México
[266]

Esta obra se terminó de imprimir el día 30 de septiembre de 1970, en los talleres de *Unión Gráfica, S. A.,* Av. División del Norte 1521-A, México 13, D. F.

La edición consta de 3,000 ejemplares y sobrantes para reposición.

L-85

OBRAS AFINES

FISICA PROGRAMADA
Volumen I. Mecánica
Volumen II: Electricidad y Magnetismo
Joseph & Leahy

FISICA FUNDAMENTAL
Segunda Edición
Orear

FUNDAMENTOS DE TERMODINAMICA
Van Wylen y Sonntag

FUNDAMENTOS DE FISICOQUIMICA
Maron y Prutton

FISICOQUIMICA
Eggers, Gregory Halsey y Rabinovitch

EXPERIMENTOS DE FISICOQUIMICA
Urquiza

MECANICA VECTORIAL PARA INGENIEROS
Parte I ESTATICA
Parte II DINAMICA
Nara

EJEMPLAR Nº 1440

He aquí el tercer volumen del primer texto completo de física programada para estudiantes de primer año de profesional o del último año de preparatoria. La preparación de este programa duró cuatro años, y sus autores lo desarrollaron cuidadosamente, a través de un proceso de constantes revisiones, basados en la información obtenida de los estudiantes que lo han probado en clase con excelentes resultados.

Este texto capacitará al estudiante para dominar las materias básicas de la física, guiándolo al ritmo más adecuado mediante incrementos de información ordenados correctamente. Lo induce a participar activamente en las experiencias del aprendizaje, contestando preguntas, resolviendo problemas, y verificando inmediatamente sus respuestas.

El presente volumen es el tercero de un programa dividido en cinco volúmenes, que incluye Mecánica (volumen I), Electricidad y Magnetismo (volumen II) Teoría Cinética y Termodinámica (volumen IV) y Tópicos de Física Moderna (volumen V).

Serie Limusa Wiley de
LIBROS PROGRAMADOS